



UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA

FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS

DEPARTAMENTO FÍSICA

Trabajo de Tesis de Maestría

***“ INCORPORACIÓN DEL CINE EN LA TRANSMISIÓN DE TEMAS DE LA
FÍSICA CONTEMPORÁNEA ”***

Tesista : Gabriel Guillermo Attilio

Director: Carlos García Canal

Año 2016

INDICE

La tesis se desarrolla según los siguientes capítulos:

I -Introducción, páginas 2 - 3

II-Conceptos básicos de Física Contemporánea: un resumen sucinto que incluye citas a la bibliografía del nivel adecuado, de la Física relevante a la escala microscópica de interés, páginas 4 -27

III-Conceptos didácticos desarrollados: un análisis de la importancia de la imagen en general y el cine en particular como herramienta de enseñanza, páginas 28 - 31

IV-Conceptos psicológicos: para comentar sobre el impacto de la imagen en la elaboración psicológica de conceptos, página 32

V-Desarrollo de la experiencia didáctica: donde se muestra el resultado, hasta este momento, del uso de la metodología didáctica propuesta basada en el cine, páginas 33 - 35

VI-Conclusiones: de la experiencia llevada a cabo hasta este momento y propuestas de su generalización, páginas 36 - 39

VII-Apéndice 1, páginas 40 - 46

VIII- Apéndice 2, páginas 47 - 62

IX- Apéndice 3, páginas 63 - 69

X- Apéndice 4, páginas 70 - 76

XI- Apéndice 5, páginas 77 - 79

XII- Bibliografía, páginas 80 - 81

I-INTRODUCCIÓN

« Shakespeare, Rembrandt, Beethoven harán cine...Todas las leyendas, toda la mitología y todos los mitos, todos los fundadores de religiones y todas las religiones mismas, esperan su resurrección luminosa y sus héroes se mueven a nuestras puertas para entrar... »

Abel Gance

“Le temps de l’image est venu »

Felix Alcan, París 1927¹

La Física Contemporánea cuyo nacimiento puede establecerse a finales del siglo XIX, a partir de las experiencias en las que se obtuvieron las primeras evidencias de los fenómenos de radiación y que dieron lugar al descubrimiento del electrón, generó un nuevo marco teórico y práctico para la humanidad en nuestro siglo XXI y permite nuevas tecnologías aplicables en el ámbito de, por ejemplo:

- La Medicina (Resonancia magnética nuclear, Tomografía computada, tratamientos a nivel molecular)
- Astronomía y Astrofísica
- Comunicaciones (Fibra óptica. Internet)
- Informática (Computación)
- Entretenimientos (Música, Efectos especiales en el cine, CD, DVD)

Esta tesina propone precisamente el empleo del cine, en principio un entretenimiento, en la transmisión de temas de la Física Contemporánea en los diferentes niveles de la enseñanza y la divulgación, generando nuevas herramientas y estrategias para los docentes y divulgadores en general.

Nos concentramos en el ámbito de las partículas elementales (bloques mínimos e indivisibles, por ahora, que conforman la materia) y de las interacciones o fuerzas que actúan entre ellas. En la actualidad, podríamos decir que hay dos tipos de partículas elementales: los *quarks* y los *leptones*, que interactúan intercambiando otras partículas, los *bosones intermedarios*.

Se conoce cuatro tipos de fuerzas actuantes sobre toda la materia y sus componentes:

- **Gravitatoria:** ligada a la masa
- **Electromagnética:** ligada a la carga eléctrica
- **Débil:** causante de los decaimientos atómicos
- **Fuerte:** mantiene unidos los quarks dentro de los núcleones

¹ Parafraseando a Abel Gance, « *Einstein, Mme Curie, Bohr, Heisenberg harán cine...Todas las leyendas, toda la mitología y todos los mitos, todos los fundadores de ciencia y todas las ciencias mismas, esperan su resurrección luminosa y sus héroes se mueven a nuestras puertas para entrar...* »

Para el estudio de las partículas y esas interacciones entre ellas, se han propuesto teorías modernas basadas en la mecánica cuántica y la teoría cuántica de campos. Es destacable que el concepto de elementalidad ciertamente evolucionó a través de la historia. Eso nos enseña que lo que se acepte como “teoría moderna”, en un futuro puede ser modificada a la luz de nuevas experiencias y descubrimientos.

Otro problema que surge es que al ser las partículas elementales de tamaño casi puntual, ¿cómo puede ser posible identificarlas? Se debe buscar patrones de regularidad o mejor llamados de repetición o periodicidad, mediante mecanismos no destructivos que consisten en observar la interacción de la materia con sistemas que permitan el intercambio de energía, como son los rayos X y, alternativamente mediante el análisis de colisiones entre las propias partículas aceleradas convenientemente. Una vez encontrado el patrón, se postula una teoría de la interacción observada. Así fue como el hombre llegó a entender los fenómenos que le dan una visión coherente del mundo subatómico, dando origen a la llamada Física de las partículas elementales.

En el marco físico descripto, la propuesta es utilizar el cine, a través de películas de fácil acceso, como medio didáctico para la transmisión y enseñanza de la Física, en particular la Física Microscópica.

El cine, en el que la tecnología aplicada actualmente tiene mucho que ver con la Física Contemporánea, desde sus comienzos, ha sido utilizado ya sea como divulgador de cultura, como arma propagandística y, en los últimos años, como herramienta didáctica. Desde ese último punto de vista, el cine proporciona una gran herramienta de fácil acceso a todos los docentes que pueden emplearla de diferentes formas y con diferentes objetivos.

Para ejemplificar el método y comentar sobre éxitos y dificultades de implementación, se han seleccionado tres películas de distintas eras del cine que tratan el tema de la radiación y la Física de las partículas elementales. Dichas cintas cinematográficas fueron adecuadamente procesadas para poder seleccionar las escenas en que se traten los temas de interés y permitan a quienes las observan sacar conclusiones que potencien la enseñanza de la Física Contemporánea.

II- CONCEPTOS BASICOS DE FISICA CONTEMPORÁNEA

- Prehistoria de la elementalidad

Desde siempre el hombre intentó conocer la naturaleza de todo lo que lo rodeaba, ya sea para sobrevivir o por la curiosidad de saber cómo estaba compuesto.

Al principio le dio intervención a lo divino para explicar el funcionamiento de todo, creando así un sinnúmero de dioses. Fue en la Grecia Antigua cuando surgió la necesidad de explicar la Naturaleza sin la intervención divina, y el lenguaje para dar esa explicación fue la Matemática. Así aparecieron las primeras teorías de la composición de la materia, que podemos dividir en dos: la primera, liderada por Demócrito quien planteó que la materia estaba compuesta por elementos muy pequeños e indestructibles llamados átomos, por la que se la denominó “escuela atómicoista”. La segunda escuela fue liderada por Empédocles, quien postulaba la existencia de cuatro elementos básicos que combinados formaban la materia: aire, tierra, fuego y agua.

Durante la Edad Media, se creía que, mediante cierta transmutación de componentes, se podía convertir algún tipo de materia en oro, mediante un agente específico al que se denominó “piedra fundamental”. Esto dio origen a la Alquimia, en algunos aspectos una clase muy primitiva de Química.

Fue en el siglo XVII, cuando Robert Boyle desechó la idea de los alquimistas y llamó “elementos químicos” a las sustancias que no podían ser transformadas en otras más simples, como el oro, platino, níquel, cobre, azufre, plata, plomo, etc. Es la primera definición moderna de “elemento”.

A principios del siglo XIX, John Dalton propone su teoría atómica que sigue las ideas de Demócrito. A partir de ésta es la Química la que avanza como ciencia. Entendió que para explicar los resultados de las experiencias químicas de la época debe existir una cantidad mínima de cada sustancia tal que sólo es posible combinar un número entero de éstas. Asigna a cada elemento conocido una masa y plantea que los elementos y, por lo tanto, la materia están constituidos por partículas pequeñísimas y macizas llamados átomos que serían indestructibles e indivisibles al combinarse en una reacción química. Esta teoría dominó la mayor parte del siglo XIX, cuando también se encontraron y ordenaron los distintos elementos químicos en una tabla, denominada en honor de su autor, de Mendeleev. Lo interesante de dicha tabla fue que tenía ciertos huecos sin elementos que, sin embargo, podrían entenderse como predicciones de la existencia de nuevos elementos químicos.

Paralelamente, durante el siglo XIX, surgen las leyes que relacionan todo lo conocido sobre los campos eléctricos y magnéticos: las ecuaciones de Maxwell (y predicen las ondas electromagnéticas encontradas más tarde por Hertz).

-Primeras evidencias del fenómeno radioactivo

La primera evidencia del fenómeno de radiación la obtuvo Wilhem Roetgen (en 1895) cuando estaba investigando el poder de penetración de los rayos que emanaban del cátodo de un tubo de Crookes (llamados rayos catódicos) y, en concreto, comprobar si podían atravesar el aluminio. Realizó la experiencia en la oscuridad y “blindando” el tubo con cartón negro para evitar que los rayos escaparan. Pero para su sorpresa se dio cuenta de que una pantalla con material fluorescente, alejada del tubo, empezó a brillar. Una vez desconectada la fuente que alimentaba al tubo, desaparecía el brillo. La causa de ese brillo debía ser una clase de rayos que emanaban del tubo y eran de naturaleza diferente a la de los rayos catódicos (que eran absorbidos por el cartón). Como se desconocía la procedencia de ese nuevo tipo de rayos, Roetgen los denominó “rayos X”. Uno de los científicos más interesados por este descubrimiento fue Antoine-Henri Becquerel. En 1896 experimentó con materiales compuestos por sales de Uranio y conjeturó, que si los exponía al sol, absorberían energía y generaría la radiación observada. Para probarlo, colocó el material (una vez que fue expuesto al sol) sobre una placa fotográfica, envuelta en papel negro. Supuso que al

exponer el mineral al sol generaría fluorescencia y, como la placa estaba envuelta en papel negro, si registraba algún efecto, sería debido a los rayos X. La experiencia fue exitosa, ya que la placa registró la influencia de esos rayos como había supuesto Becquerel. Pero después, cuando quiso repetir la experiencia, el clima no se lo permitió y por error dejó en un cajón la placa y por arriba el mineral de Uranio. Días más tarde, abrió el cajón y descubrió que la placa tenía la impresión del material. Para comprobar que lo sucedido no fue obra del azar, repitió la experiencia de dejar el mineral sin exponer al sol y verificó que seguía dejando marca en la placa. Así que la hipótesis que propuso se derrumbó. Siguió pensando que el causante del efecto de dejar grabada en la placa la forma del mineral eran los rayos X. Para poder cuantificar la intensidad de los rayos X, Becquerel utilizó un electroscope. Quería verificar si los rayos emitidos podían ionizar el aire (perdían carga eléctrica) y volverlo conductor. Al hacer la experiencia observó que un electroscope cargado se descargaba debido a los rayos, pero no logró hacer una cuantificación de su intensidad. Sólo podía medir la variación del ángulo formado por las laminillas del electroscope. Pero encontró otro efecto: las propiedades de los rayos emitidos por el Uranio no eran las mismas que las de los rayos encontrados por Roetgen, por lo que los llamó "rayos uránicos o alfa".

Fueron Pierre y Marie Curie los que, interesados por el descubrimiento de Becquerel, siguieron investigándolo. Pero en lugar de usar placas fotográficas y electroscoios utilizaron un electrómetro adaptado por Pierre². Hecha la experiencia, trabajando con distintos elementos conocidos, llegaron a la conclusión de que el Uranio no era el único elemento que producía esos rayos, por lo que había que dejar de llamarlos "uránicos". El Torio también emitía rayos. En 1898, denominaron a esos rayos "radio-actividad".

De estas experiencias también llegaron a otra conclusión importante: los rayos emitidos eran propiedad de los elementos, independientes de si formaban parte de un compuesto o si eran previamente expuestos al sol. Era un fenómeno nuevo, característico del átomo en cuestión.

Así fue como de esas experiencias, descubrieron además otros elementos desconocidos, activos y que emitían radiación como el Uranio y el Torio. Se los llamó Radio y Polonio.

Al final de estos resultados, aún no había respuesta del porqué de la radiación. Los Curie propusieron algunas hipótesis, que podríamos resumir así³:

- 1- la radioactividad es una fosforescencia de larga duración producida por la luz.
- 2- El rayo es una emisión de materia acompañada de una pérdida de peso de las sustancias radioactivas.
- 3- La energía utilizable por las sustancias radioactivas disminuye constantemente
- 4- El rayo es una emisión secundaria provocada por rayos análogos a los rayos X. Estos rayos excitantes vendrían del espacio, serían más penetrantes que los rayos X y solo serían absorbidos por elementos de gran peso atómico, tales como el Uranio y el Torio. Es posible suponer que en el espacio pueden tener lugar transferencias de energía que no conocemos.
- 5- El rayo se produce a expensas de la energía del medio, violando el principio de Carnot.

Será Ernest Rutherford, el que al experimentar y proponer la existencia del núcleo como elemento componente del átomo, dará un marco teórico al origen de la radiación como fenómeno originado en el núcleo atómico.

Desde el siglo XVIII⁴, se sabía que si dentro de un tubo en el que se hizo vacío se aplicaba, entre los extremos terminales, una diferencia de potencial, del cátodo se emitía una radiación, que se

² Para la descripción divulgativa del instrumento y su funcionamiento, ver, por ejemplo, el libro Marie Curie. La radioactividad y los elementos. El secreto mejor guardado de la materia. Adela Muñoz Paez . Pág 48 a 50. Colección Grandes ideas de la Ciencia.RBA Coleccionables.2012

³ Marie Curie.La radioactividad y los elementos. El secreto mejor guardado de la materia .Adela Muñoz Paez .Pág 70. Colección Grandes ideas de la Ciencia. RBA Coleccionables.2012

denominó radiación beta. El 1897, Joseph.J.Thomson, experimentando con un tubo de Crookes⁵, descubre que la emisión de rayos beta que salían del cátodo y se dirigían al ánodo, eran desviados por un campo magnético por lo que tenían carga eléctrica y masa. Todos los elementos conocidos contenían ese tipo de partículas. Se las denominó “electrones”. Según Thomson, si todos los elementos contenían esas partículas quiere decir que forman parte del átomo. Pero, si el átomo es neutro eléctricamente ¿qué neutraliza la carga negativa de los electrones? Entonces Thomson propone un modelo atómico en el cual los electrones “flotaban” en una “sustancia” que debía tener carga positiva, como si fuesen pasas en un pastel. Por eso se denominó al modelo “modelo del pastel de pasas”. Pero sucedía que si solo existiesen los electrones, debería haber una gran cantidad de ellos para que se explicase la masa del átomo. Pero esta hipótesis falló cuando se comprobó que el número de electrones del átomo de un elemento debía coincidir con el número atómico en la tabla periódica.

Fue entonces cuando Rutherford realizó sus experimentos⁶, que condujeron al descubrimiento del núcleo atómico: aún no se conocía la naturaleza de los rayos alfa. Al hacer impactar rayos alfa sobre una placa de oro observó que: la mayoría de las partículas alfa atravesaban limpiamente la placa y chocaban con una pantalla detectora ubicada detrás; algunas partículas alfa sufrían una pequeña deflexión y muy pocas partículas rebotaban y regresaban hacia atrás o se desviaban en ángulos muy abiertos.

La explicación de que las partículas alfa se desviasen debería ser que dentro del átomo, existe “algo” con masa capaz de hacer desviar partículas. Entonces Rutherford propone un modelo atómico similar al sistema solar: en el centro un elemento muy masivo, pero muy pequeño, de carga positiva que llamaría “núcleo”, alrededor del cual giran los electrones. Al mismo tiempo caracterizó a los rayos alfa como compuestos por partículas positivas que serían núcleos de helio. Ahora estaba dado un paso importante para poder explicar el fenómeno de radiación. Constató que existían elementos que además de emitir rayos alfa y beta, producían una “emanación” semejante al vapor⁷ y se propuso estudiarla. Primero logró que se restringieran a un tubo, pero de inmediato dicho tubo empezaba a emitir, como si un elemento transformase a su alrededor. Por ejemplo, el Torio volvía radiactivo todo a su alrededor, aunque por un poco tiempo. Entonces ¿qué eran esas “emanaciones”? ¿ Vapor u otro tipo de partículas que excitaban radioactividad en otras sustancias?. A la misma conclusión llegaron los Curie. Los elementos como el Torio eran capaces de provocar radioactividad en otros elementos; una “radioactividad inducida” la llamaron. Pero pronto se desechó esa hipótesis. Fue Becquerel, mediante otra experiencia en la que, al tratar de separar los elementos componentes de la sal de Uranio, comprobó que dejaba de ser radioactiva; pero un nuevo elemento detectado emitía la radiación. Al desconocer qué era esa sustancia, la llamó “Uranio X “.Pero luego de unos meses, al volver a revisar las muestras encontró que el “Uranio X “había dejado de ser radioactivo y la sal de Uranio volvió a irradiar. Al conocer estos resultados, Rutherford quiso comprobar si lo mismo pasaba con el Torio. Experimentando junto a Frederick Soddy, encontraron que en el Torio sucedía lo mismo: del Torio separaron una sustancia, el “Torio X” de forma que la radiación del Torio perdía intensidad exponencialmente mientras que la del Torio X aumentaba. Observaron que el Torio producía Torio X, aumentando su intensidad de radiación, y que el Torio X generaba una “emanación”, disminuyendo exponencialmente su intensidad de radiación. Todo apuntaba a que los dos fenómenos no ocurrían al azar y que había una relación entre el Torio y el Torio X. El Torio generaba Torio X a partir de la descomposición del átomo de Torio. Era como la

⁴ Una expedición al mundo subatómico .Daniel de Florian. Pág 24 EUDEBA.2007

⁵ https://es.wikipedia.org/wiki/Tubo_de_Crookes

⁶ Rutherford.El núcleo atómico.Los átomos también tienen corazón. Roger Corcho Orrit.Pág 18,19 y 20. Colección Grandes ideas de la Ciencia. RBA Coleccionables.2012

⁷ Rutherford.El núcleo atómico.Los átomos también tienen corazón. Roger Corcho Orrit.Pág 72. Colección Grandes ideas de la Ciencia. RBA Coleccionables.2012

relación padre-hijo (como lo expreso Rutherford). Más tarde descubrió que el Torio X era en realidad un isótopo de radio. Pero ¿dónde entraba en todo esto la radiación? ¿cómo se relacionaban estos fenómenos con los rayos alfa y beta?. Entre 1902 y 1903, Rutherford y Soddy desarrollaron una teoría sobre desintegraciones radioactivas. Enunciaron que la radioactividad se producía porque existen elementos como el Uranio y el Torio que se transforman en otros y en ese fenómeno se emiten rayos alfa y beta. Con la transformación o desintegración del átomo original – el elemento padre – aparece otro átomo (Torio X o Uranio X) también radioactivos- llamado elemento hijo-, como podían ser el Radio o el Polonio. Estos eran más inestables y más radioactivos, por lo que se desintegraban más rápidamente, generando otros elementos también radioactivos. Se entendió entonces que los rayos alfa y beta eran consecuencia de la desintegración en el interior de la materia, debido a la inestabilidad esencial de los núcleos de los elementos radioactivos. Ya no eran vistos como radiaciones sino como partículas que escapaban de los átomos, de modo que eso alteraba su naturaleza.

Ahora bien, si el elemento hijo emite radiación también es inestable, se desintegra, generándose un tercer elemento que, a su vez, también es radioactivo y así siguiendo, ¿hasta cuánto sigue este fenómeno? .Al final, de uno de los elementos generados se desprenderá un elemento que será estable y no radioactivo.

Resultó evidente que, a partir de un elemento radioactivo, se desprendían otros elementos radioactivos hasta qué, al final, se llegaba a un elemento estable⁸. Se formaba lo que llamó “familia o serie radioactiva”, como las del Uranio, Torio y Actinio.

-Formalización de la Mecánica Cuántica

A mitad del siglo XIX, Maxwell formuló un conjunto de cuatro ecuaciones diferenciales con las que era posible resolver cualquier problema del Electromagnetismo y explicar el fenómeno de la luz. Se había establecido la segunda ley de la Termodinámica, gracias a los postulados de Kelvin-Planck y Classius. Pero surgieron problemas en situaciones que indicaron que no era el fin de las explicaciones teóricas físicas. Entonces Boltzmann propone su explicación estadística a los fenómenos termodinámicos.

Otro problema se planteó al estudiar el espectro de radiación de un cuerpo negro. Fue a Max Planck al que se le ocurrió utilizar un modelo estadístico similar al de Boltzmann, para analizar el espectro de energía radiante del cuerpo negro, incluyendo la hipótesis de la discretización de la energía. Eso provocó que se debiera cambiar uno de los paradigmas que venían de la mecánica clásica que postulaba que la energía variaba en forma continua. Necesitaba aplicar conceptos estadísticos para estudiar el problema y encontrar la distribución probabilística de las posibles configuraciones energéticas en la radiación electromagnética. Para ello propone que la energía se emitía en “paquetes discretos” o “cuantos” de valor

$$\varepsilon = h \nu$$

con h la “constante de Planck “de valor $6,63 \cdot 10^{-34}$ J/Hz y ν la frecuencia.

Cuando el sol atraviesa un prisma, se forma un arco iris, un degradado continuo de colores. Cada color de este espectro se caracteriza por una frecuencia o, su equivalente, una longitud de onda. Ahora consideremos un gas calentado hasta la incandescencia, como sucede en un tubo fluorescente

⁸ Rutherford.El núcleo atómico.Los átomos tambien tienen corazón. Roger Corcho Orrit.Gráfico de la Pág 86 y 148. Colección Grandes ideas de la Ciencia. RBA Coleccionables.2012

o en las lámparas que iluminan las carreteras. Si esa luz emitida por el gas pasa por un prisma, no se observa un degradado continuo sino solamente líneas brillantes en ciertos valores de frecuencia, por eso se habla de espectro discreto de emisión. Si se analiza mediante un prisma la luz blanca que ha pasado previamente a través de un gas, se observa que sobre el espectro continuo aparecen rayas oscuras, precisamente a las frecuencias de las rayas brillantes emitidas por el mismo gas, y se lo denomina espectro discreto de absorción⁹. En 1860 los alemanes Kirchhoff y Bunsen mostraron que los espectros discretos permiten identificar a los elementos, recordando a los productos envasados que se identifican mediante un código de barras. Así se podría hacer un catálogo detallado de las frecuencias del espectro discreto correspondiente a cada elemento, es decir, una lista de valores medidos. El problema es que se debía tener en cuenta tanto las frecuencias del espectro visible como el no visible, lo que implicaba un número de rayas enorme como en el caso del hierro. El caso más sencillo era el espectro discreto del Hidrógeno. En la zona visible sólo aparecen cuatro rayas, cuyas longitudes de onda fueron medidas por el sueco Anders Angström. Al año siguiente, el matemático suizo Johann Balmer propuso una fórmula empírica para obtener las frecuencias del espectro visible del hidrogeno, dada por

$$f = R \left(\frac{1}{4} - \frac{1}{n^2} \right)$$

con $R = 1,097 \cdot 10^7 \text{ m}^{-1}$, llamada constante de Rydberg, y $n > 2$, un número entero. Aunque la fórmula funcionó bien, no había una justificación física para ésta.

Años después, cuando Rutherford propone su modelo atómico, apareció una incongruencia al aplicársele las ecuaciones de Maxwell: si fuese como el sistema planetario, los cuerpos están sujetos a la fuerza de atracción gravitatoria, pero la teoría de Maxwell indicaba que una partícula cargada en movimiento acelerado radiaba energía, por lo que, si se suponía que el electrón giraba alrededor del núcleo, debía perder energía e inexorablemente caer al núcleo. Pero esto no sucedía. Fue Niels Bohr el que modificó el modelo aplicando la hipótesis cuántica. Para ello impuso una serie de “condiciones” que no justificó y quedaron como postulados de su modelo atómico:

-Los electrones tienen órbitas circulares determinadas, a determinada distancia del núcleo. El radio de las órbitas sólo podía tomar valores discretos.

-Mientras el electrón rota en la órbita que le corresponde, no emite ni pierde energía.

-Cada órbita trae aparejada un valor de energía.

-El electrón puede cambiar de órbita: si decae a una órbita inferior emite un paquete de energía o fotón. Si pasa a una órbita mayor, debe absorber energía de un fotón o colisionar con otra partícula. Esta condición lo deja al electrón en lo que se conoce como un “estado excitado”, el cual es una situación inestable, y el electrón volverá a caer a su órbita permitida.

-La diferencia de energías entre dos órbitas será igual a la energía de un cuanto propuesto por Planck, o sea

$$\Delta E = E_f - E_i = h \nu$$

Mediante cálculos sencillos (ver Apéndice 1), demostró que la energía de cada órbita era

⁹ Heisenberg, El principio de incertidumbre, Existe el mundo cuando no lo miras?, Pág 22-23 Colección Grandes ideas de la Ciencia. RBA Coleccionables. 2012

$$E_n = - \frac{2 \pi^2 m e^4 K_e^2}{n^2 h^2} = - \frac{K}{n^2}$$

con m la masa del electrón, e su carga, K_e la constante de permitividad eléctrica (cuyo valor es 1 en el sistema CGS) y h , la constante de Planck. A n se lo llamaría “primer número cuántico”; denota una órbita de radio distinto. El estado fundamental corresponde a $n = 1$. El valor negativo implica que el electrón posee menos energía cuando está ligado al núcleo que cuando está en libertad. Al realizar la resta para dos valores sucesivos de energía, e igualar esa diferencia a la ecuación de Planck, verificó la fórmula de Balmer y dedujo el valor de la constante de Rydberg¹⁰.

Pero el modelo atómico de Bohr aún no podía explicar lo que sucedía en átomos con muchos electrones, ya que, en laboratorio, al estudiar las líneas de espectros, aparecían frecuencias que no aparecían en el modelo de Bohr y, por otro lado, no incluía correcciones relativistas, debido a la velocidad del electrón. Las primeras correcciones al modelo las hizo Arnold Sommerfeld, que propuso un modelo en que las órbitas fuesen elípticas. La elipse se caracteriza por dos distancias fundamentales, los semiejes mayor y menor, por lo que se necesitarían dos números cuánticos. Además de n , está k , que varía de 1 a n ; pero en general se adopta el valor $l = k - 1$, que toma valores de 0 a $n - 1$. El número l está asociado a la excentricidad de la elipse.¹¹ Por otro lado, para considerar el efecto relativista, corrigió la expresión de la energía propuesta por Bohr, con el

parámetro $\alpha = \frac{e^2}{\hbar c}$ (“constante de estructura fina”). Así la expresión de la energía con la corrección relativista es

$$E_{n,l} = - \frac{R}{n^2} \left[1 + \frac{\alpha^2}{n^2} \left(\frac{1}{l+1} - \frac{3}{4n} \right) \right]$$

Al mismo tiempo, se observó que, frente a campos eléctricos o magnéticos, las líneas espectrales se dividían de a dos o más partes. El holandés Pieter Zeeman observó que, en presencia de un campo magnético, algunas líneas espectrales originaban un triplete, con dos líneas extras, una a cada lado de la original. Sommerfeld dio una explicación a lo anterior, ampliando el modelo de Bohr. Cuando el electrón rota en una órbita, genera un campo magnético como una espira de corriente. Este campo interacciona con el exterior y la energía de interacción depende del ángulo que forman ambos. Ese ángulo debía cumplir con las reglas cuánticas y tomar valores discretos, caracterizados por un nuevo número cuántico, m . Así que, en presencia de campos externos, la energía de los estados estacionarios dependerá de los tres números cuánticos n , l y m .

Pero había una dificultad en todo lo anterior: ¿cómo se deducían esos postulados para hacerlos más consistentes?. La respuesta fue el “principio de correspondencia”, que guió a la incipiente Mecánica Cuántica, a principios de 1920. El punto fundamental de este principio es que debía haber una continuidad entre el mundo clásico y el mundo cuántico.

Esta continuidad se manifestaba en ambos sentidos: toda teoría específica que explicara la radiación a niveles subatómicos debía ser tal que, aplicada a números cuánticos grandes, debería dar los mismos resultados que la física clásica. Y a la inversa, una vez que se formulen modelos

¹⁰ Heisenberg. El principio de incertidumbre ¿Existe el mundo cuando no lo miras? Pág 64-65. RBA Coleccionables. 2012

¹¹ Schrodinger. Las paradojas cuánticas. El universo está en la onda. David Blanco Laserna. Gráfico página 67. RBA Coleccionables. 2012

Heisenberg. El principio de incertidumbre ¿Existe el mundo cuando no lo miras? Pág 51 RBA Coleccionables. 2012

subatómicos de la radiación subatómica, usando la Física Clásica, se les puede aplicar el criterio de cuantización.

Por “cuantizar” se entiende imponer la condición de cuantificación a las magnitudes clásicas, como energía y momento angular, que deben ser números enteros por la constante de Planck.

Fue lo que hizo Bohr al plantear su modelo atómico en 1913, y los cambios de energía, al saltar los electrones de una órbita a otra. Sommerfield lo extendió a la excentricidad de las órbitas y al momento angular asociado con ellas.

¿Es lo que Bohr buscaba?. Fue la manera elegante de introducir la constante de Planck en los modelos clásicos.

Con el modelo de Sommerfield-Bohr, se empezó a atisbar una explicación del mundo subatómico, pero quedaban aún preguntas, surgidas de experiencias, sin respuestas. Y fue Louis, duque de de Broglie, quien dio el paso siguiente. Analizando el efecto fotoeléctrico, explicado por Einstein años antes, de Broglie planteó que, si la luz presentaba características corpusculares en ciertas situaciones, por qué el electrón no podía presentar rasgos ondulatorios. Conjeturaba una simetría entre el mundo corpuscular y el ondulatorio. Propuso que un electrón, moviéndose libremente en el espacio, llevaba asociada una onda de longitud de onda $\lambda = h / p$, siendo p la cantidad de movimiento del electrón. Al plantear esta hipótesis, propuso que, cuando un conjunto de electrones que tiene asociada una longitud de onda del orden de las distancias interatómicas impacta contra un cristal, se debería formar un patrón de difracción, típico de un fenómeno ondulatorio. Fueron los norteamericanos Clinton Davisson y Lester Germer y los británicos Alexander Reid y George Thomson quienes llevaron a cabo la experiencia, haciendo que un haz de electrones impactara contra una placa de cristal de níquel y observaron que, al contar los electrones desviados en cada dirección, se formaba un perfil ondulatorio de dispersión¹²

Entonces, aceptando el planteo de Broglie, fue Ernst Schrödinger quien dio un modelo matemático a la onda asociada con los electrones, siguiendo el patrón de un fenómeno ondulatorio clásico, formulando una ecuación diferencial similar a la que modeliza la oscilación de una cuerda¹³

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \left(\frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2} \right) + V \Psi = i \hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t}$$

siendo $\hbar = \frac{h}{2\pi}$, Ψ la función de onda que depende de la posición y el tiempo, y V la función energía potencial debida a la interacción entre el medio ambiente y el electrón. Ψ es una función que deberá verificar, por lo tanto la condición de que

$$\int_{-\infty}^{\infty} |\Psi(x,t)|^2 dx = 1 \quad (\forall t)$$

Con esta ecuación diferencial, se dio un modelo matemático que explicara razonablemente los fenómenos de la mecánica cuántica

Pero paralelamente se trabajó en otro tipo de formulación de la Mecánica Cuántica. Fueron Wolfgang Pauli y Werner Heisenberg los principales promotores de la nueva formulación.

Heisenberg introdujo el tema de la incerteza de ubicar una partícula conociendo simultáneamente su velocidad. Matemáticamente, en una dimensión, se plantea el “principio de incerteza” como

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$$

¹² Schrodinger. Las paradojas cuánticas. El universo está en la onda. David Blanco Laserna. Gráfico página 71. RBA Coleccionables. 2012.

¹³ Tema ampliado en en Apéndice 2

siendo Δx la precisión de media de la posición y Δp la precisión de la medida simultánea de la cantidad de movimiento de la partícula, en la misma dirección. Indica que, a diferencia de lo que sucedía en la Mecánica clásica, en la Mecánica cuántica no existe la trayectoria de una partícula.¹⁴ Según la mecánica clásica, toda partícula de masa m debe verificar, observada desde un sistema de referencia inercial, la segunda ley de Newton.

$$\sum_{i=1}^N \vec{F}_i = \frac{d(m \vec{v})}{dt} = m \frac{d^2 \vec{r}}{dt^2}$$

donde \vec{F}_i es la fuerza que un agente exterior i ejerce sobre la masa m , $\vec{r}(t) = x(t)\hat{i} + y(t)\hat{j} + z(t)\hat{k}$ es la posición de la masa en el tiempo t . La aplicación de la segunda ley de Newton lleva a un problema de valores iniciales, donde, para obtener la solución de la ecuación diferencial de segundo orden, debemos conocer, en este caso, la posición y la velocidad en un determinado tiempo inicial t_0 ($\vec{r}(t_0)$ y $\vec{v}(t_0)$). Así se podría determinar la trayectoria de la partícula de masa m . Pero según el principio de incerteza, no es posible determinar posición y velocidad simultáneamente. Por lo tanto, en Mecánica cuántica, no podremos hablar de una “trayectoria” de la partícula.

Hasta el momento, para la descripción matemática de un átomo (ya que no era posible conocer simultáneamente las condiciones iniciales), sólo se tenía el álgebra matricial propuesto por Heisenberg (Ver Apéndice 2) y la caracterización del átomo por medio de tres números cuánticos. Fue Pauli quien sugirió que un electrón se caracteriza por cuatro números cuánticos: n , l , m y uno nuevo, que sólo podría tomar dos valores semienteros. Enunció también el principio de exclusión que lleva su nombre: en un átomo no puede haber dos electrones que tengan los mismos números cuánticos.

-Estructura del núcleo.

La idea de utilizar la energía liberada al romperse el núcleo atómico, empezó con las experiencias hechas por Rutherford, después de proponer su modelo atómico. Haciendo impactar partículas alfa sobre nitrógeno gaseoso, observó que la pantalla detectora tintineaba debido a partículas desconocidas, que comprendió que no era radiación, sino núcleos de hidrógeno. Al mismo tiempo, en el proceso, el Nitrógeno se transmutaba en Oxígeno. Al impactar las partículas alfa, eran absorbidas por el núcleo de Nitrógeno, resultando una sustancia inestable, por lo que se debía emitir cierta partícula procedente del núcleo, para estabilizar al sistema. La partícula emitida era de carga positiva y con características del núcleo de hidrógeno. Es lo que conocemos como “protones”, nombre que se estableció en 1920. La conclusión de estas experiencias fue que se logró “romper” el núcleo atómico de manera artificial. Rutherford planteó la idea de que si se tuviesen partículas (alfa o similares) muy energéticas que impactasen contra cualquier tipo de átomos más pesados, se podría romper su núcleo.

Una vez que se aceptó la existencia de los protones en el interior del núcleo, se resolvió el enigma de porqué el átomo era neutro, pero simultáneamente surgió otra cuestión: si los protones tienen carga positiva y es válida la ley de fuerzas coulombianas intensas, se deberían repeler, con lo que el núcleo se rompería en pedazos. Lo anterior lleva a la conclusión de que, como el núcleo existe, debe existir otro tipo de interacción en su interior, muy poderosa y capaz de contrarrestar la

¹⁴ Para más detalle, ver el Apéndice 2.

repulsión coulombiana y a dicho proceso se lo denominó “Interacción o fuerza nuclear”. Al mismo tiempo, al medirse experimentalmente la masa de núcleo y comparársela con la de los protones en su interior, no coincidían. Se conjeturó que debía existir otra partícula en el interior del núcleo con masa pero sin carga eléctrica que contribuyese a la interacción fuerte.

En esos años empezaron a descubrirse más partículas.

Al aplicar Dirac las correcciones relativistas en la ecuación para electrones, encontró que dentro de sus soluciones, había estados de energía negativa. Predijo así la existencia de lo que se denominó “antipartículas”. Se verificó experimentalmente la existencia de una de ellas, al estudiar Carl Anderson los rayos cósmicos. Denominó “positrón” a la antipartícula del electrón, que tenía la masa del electrón pero carga opuesta. Con el paso del tiempo y de las experiencias se fueron descubriendo otras antipartículas.

Pero volvamos nuevamente al estudio de la estructura atómica. Irene Curie y Frederick Joliot hicieron impactar partículas alfa sobre berilio, logrando una radiación de gran energía pero compuesta por partículas más masivas que el electrón. Fue entonces cuando James Chadwick, quien mediante experiencias con radiación alfa impactando sobre una placa de berilio, encontró que emanaban del núcleo de berilio partículas tan masivas como el protón pero sin carga y muy energéticas. Llamó a esa partícula “neutrón”.

Con los nuevos elementos descubiertos, se completó el modelo atómico propuesto inicialmente por Rutherford:

- a-un núcleo en el centro con neutrones y protones en su interior.
- b- electrones orbitando alrededor del núcleo

Pero el neutrón tiene una propiedad notable, observada por Rutherford en sus experimentos: su inestabilidad. Si, en sentido figurado, dejamos a un neutrón sobre una mesa, no permanecerá mucho tiempo allí, teniendo un tiempo de vida media de 15 minutos. En su lugar se tendrá un protón, un electrón y otra partícula. Por eso se dice que el neutrón se “desintegra” fuera del núcleo. Entonces, si un neutrón libre se desintegra, ¿qué sucede dentro del núcleo atómico?. Al estar libre, el protón resultante puede moverse a cualquier lado, ya que no tendrá otros protones que actúen sobre él. Pero en el interior del núcleo, si se desintegrarse el neutrón, el protón resultante sería repelido por los otros protones en su vecindad (es válido el principio de exclusión de Pauli). Pero hay átomos cuyos núcleos son inestables (como vimos al reseñar las experiencias de Rutherford). Un neutrón se desintegra, emitiendo un electrón y el átomo queda cargado positivamente. La emisión de electrones conforman el fenómeno denominado radiación beta. En lo anterior, observamos que se verifica el principio de conservación de la carga ya que, al ser neutro el neutrón y emitir un protón y un electrón, al final se mantiene la carga cero. Pero se observó que no se cumplía el principio de conservación de la energía. Fue Pauli quien propuso la existencia de otra partícula, el neutrino (ν) y su antipartícula, el antineutrino ($\bar{\nu}$) que deberían ser de carga nula y tener una energía que haría mantener constante la energía del sistema. Era difícil de establecer su existencia porque, al ser eléctricamente neutro, no interactúa con otras partículas con carga y tiene masa muy pequeña por lo que no produce efectos detectables al impactar con núcleos con los que choca. Fermi logró detectarlo mediante un reactor nuclear. Las reacciones en las que intervienen los neutrinos son de una baja intensidad, por lo que a esas interacciones se las denomina débiles.

En la actualidad, se puede formalizar lo anterior de la siguiente manera. Se utilizarán dos números importantes que definen y caracterizan al átomo.

- a El número atómico, Z , cantidad de protones dentro del núcleo (e igual al número de electrones)
- b El número másico, A , cantidad de partículas que componen el núcleo

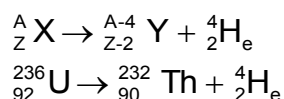
Por lo tanto

$$\text{Número de neutrones} = A - Z$$

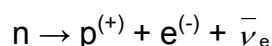
Según lo visto, se encontraron tres tipos de radiación:

- a radiación alfa: Las partículas alfa son núcleos de helio. Por lo tanto, cuando un átomo emite una partícula alfa, pierde dos protones lo que hace que el número atómico sea $Z-2$, lo que indica un nuevo elemento. Cuando el Uranio ($Z=92$) emite una partícula alfa, se convierte en Torio ($Z=90$). Esta desintegración sucede espontáneamente porque es energéticamente posible sin suministrar energía extra: la masa del núcleo padre es mayor que la del núcleo hijo sumada a la de la partícula α ya que, en el núcleo se produce una disminución en la energía coulombiana a causa de la pérdida de la partícula con carga $+2e$. La energía disponible en el proceso es llevada, como energía cinética, por la partícula α emitida. La masa de una partícula α es del orden de $3,73\text{GeV}$. Su energía cinética, de unos 5MeV . Dada su gran masa y su velocidad relativamente baja (junto con su carga distinta de cero), estas partículas tienen alta probabilidad de interactuar electromagnéticamente con la materia y van perdiendo energía, hasta ser absorbidas luego de haber recorrido algunos centímetros en el aire.

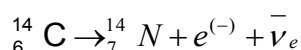
Por ejemplo, sea un elemento ${}^A_Z X$. Al producirse una desintegración alfa, tendremos que



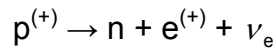
- b radiación beta: Es un fenómeno más complejo y ocurre cuando un neutrón se convierte en un protón o viceversa. En este intercambio se generan nuevas partículas. Esta radiación puede clasificarse en dos tipos: la $\beta^{(+)}$ y la $\beta^{(-)}$. En la desintegración denominada $\beta^{(-)}$ se emite un electrón, que surge del núcleo y no debido a la ionización de la capa electrónica que conforma al átomo. En la desintegración además se desprende un protón y un antineutrino electrónico, que se simboliza $\bar{\nu}_e$. Se puede interpretar la desintegración de un neutrón según



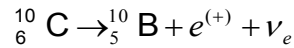
Al variar el número de protones ($+1$) varía el número atómico y, por lo tanto, se convierte en otro elemento. En cambio el número másico permanece inalterable, pues pierde un neutrón, pero gana un protón que posee prácticamente la misma masa que el neutrón. Por ejemplo es lo que ocurre con el isótopo del ${}^{234}_{90}\text{Th}$, que, tras la desintegración $\beta^{(-)}$, emite un electrón y el átomo se convierte en un isótopo del Proactinio, el ${}^{234}_{91}\text{Pa}$. Otro ejemplo, es lo que sucede con ${}^{14}_6\text{C}$, cuya desintegración $\beta^{(-)}$ la representamos



La otra radiación, la $\beta^{(+)}$ aparece cuando un protón emite un positrón, que es una antipartícula del electrón ($e^{(+)}$) más un neutrón más un neutrino electrónico, que simbolizamos ν_e . Otra vez el número de partículas nucleares es inalterable, pero perdiendo un protón, convirtiéndose en otro elemento. La simbolizamos como



Cómo ejemplo, la desintegración del $^{10}_6\text{C}$ la representamos como



c. Radiación gama: desexcitación de núcleos emitiendo fotones

Gracias al descubrimiento del neutrón, se tenía ahora partículas con mucha energía con las que impactar a cualquier átomo. Fueron entonces Lisa Meitner y Otto Hahn quienes llevaron a cabo este proceso que se denominó “fisión nuclear “. Al hacer impactar neutrones sobre Uranio, un neutrón rompe en dos uno de los núcleos de Uranio, liberándose gran cantidad de energía, obteniéndose dos núcleos más livianos, Kriptón y Bario. Al mismo tiempo se liberaban dos neutrones, los que podían impactar en otros átomos de Uranio y así provocar una “reacción en cadena “. ¹⁵

Surgió la necesidad de que si se querían estudiar las partículas atómicas, se debería contar con partículas más energéticas que las obtenidas de forma natural mediante una radiación. Por eso surgieron los “aceleradores de partículas “, sistemas que mediante intensos campos eléctricos y magnéticos permitían acelerar y enfocar a las partículas. Los primeros en idearlos y llevarlos a cabo fueron el ruso Pyort Kapitsa, los británicos John Cockcroft y Ernest Walton y el estadounidense Ernest Lawrence. ¹⁶⁻¹⁷

Con los aceleradores, empezaron a surgir una serie de partículas que no se conocían hasta el momento. ¹⁸

En la década de 1930 los acontecimientos políticos en Europa (el fortalecimiento de Mussolini en Italia y el surgimiento de Hitler en Alemania) provocaron que la mayoría de los científicos más importantes en el tema (Bohr, Fermi, Szilard, Teller, etc) emigraran a otros países.

Fue en EEUU donde, con el apoyo gubernamental, que se acrecentó con la entrada del país en la guerra, se desarrolló una carrera para obtener un arma basada sobre la energía desprendida de la fisión. En Alemania habían quedado pocos científicos valiosos en el tema; el principal fue Heisenberg.

- Medición de la radiación ¹⁹

El descubrimiento del fenómeno radioactivo trajo, al inicio, consecuencias impensadas por los científicos:

- era un fenómeno desconocido, por lo cual se debía tomar recaudos ante su potencial peligro y
- el uso que se daría al descubrimiento como utilidad para el ser humano, ya sea con fines pacíficos como bélicos

¹⁵ Rutherford.El núcleo atómico.Los átomos también tienen corazón.Roger Corcho Orrit.Gráfico de la Pág 129. Colección Grandes ideas de la Ciencia RBA Coleccionables.2012.

¹⁶ Rutherford.El núcleo atómico.Los átomos también tienen corazón.Roger Corcho Orrit.Gráfico de la Pág 131 a 141. Colección Grandes ideas de la Ciencia RBA Coleccionables.2012.

¹⁷ De los átomos a los quarks.James Trefil.Capítulo 6.Pág 73-87.Editorial Salvat.1985

¹⁸ Fermi.La energía nuclear.La fisión hace la fuerza.Antonio Hernandez-Fernandez.Gráfico de la Pág 47 RBA Coleccionables.2012.

¹⁹ <http://tratado.uninet.edu/c090104.html>

Marie Curie fue la primera en sufrir las consecuencias de la falta de cuidado al manipular con esos nuevos elementos. Lo pagó con su vida, ya que falleció de leucemia, causada por años de trabajar con elementos radioactivos. Por otro lado, fue ella misma quien notó el potencial uso de la radioactividad para detectar problemas que los médicos no podían analizar a simple vista, lo que dio origen al diagnóstico por rayos X y a la Radioterapia.

Con el paso del tiempo, los científicos se fueron adaptando a los nuevos fenómenos y lograron, de cierta manera, controlar su uso, mediante la medición de las dosis de radiación a la que se exponían, inventando instrumentos de medición y dando unidades a las magnitudes con la que cuantificar las dosis de radiación.

a- Instrumentos de medida:

Los humanos no disponemos de ningún órgano sensorial apropiado para detectar la radiación. Por ello, dependemos de algunos instrumentos para indicar la presencia de radiaciones ionizantes en el entorno.

Detectores de cámara gaseosa:

El tipo más común de detector de radiaciones ionizantes es el detector de cámara gaseosa (figura 3). Está basado precisamente en la capacidad de la radiación de formar iones al atravesar el aire u otro gas específico. Cuando se dispone un alto voltaje entre dos zonas de una cámara llena de gas, los iones positivos serán atraídos hacia el polo negativo del detector (el cátodo), y los electrones libres lo serán hacia el polo positivo (el ánodo). Si ambos electrodos se conectan a un instrumento de medida de la diferencia de potencial creada, aparecerá una señal tanto mayor cuanto mayor sea la dosis de radiación detectada por el instrumento. Este principio da lugar a la cámara de ionización, que puede detectar grandes cantidades de radiación, o al conocido detector de Geiger-Müller, que se utiliza para medir cantidades de radiación muy pequeñas.

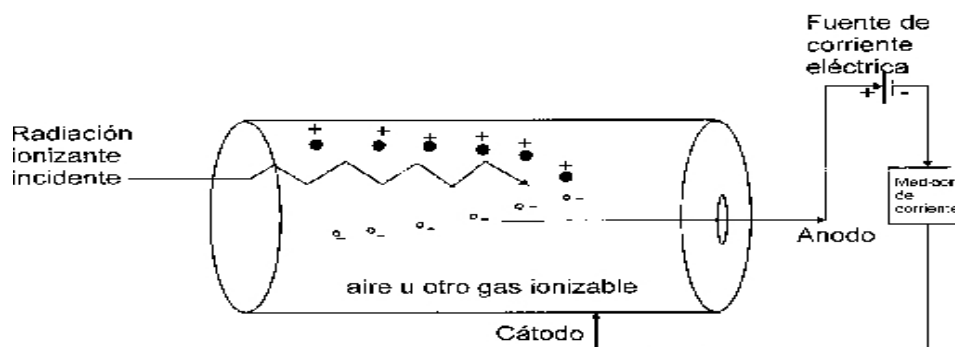


fig 3

Detectores de centelleo:

Otro tipo muy común de aparato detector de la radiación es el detector de yoduro sódico o contador de centelleo (figura 4). El principio básico del aparato es la utilización de un material que produce

una pequeña cantidad de luz cuando la radiación incide sobre él. El más utilizado es el cristal de yoduro sódico. La luz producida por la radiación -centelleo- es reflejada a través de una ventana, y es amplificada inmediatamente por un instrumento llamado tubo fotomultiplicador. La primera parte está fabricada de otro material, llamado fotocátodo, que tiene la característica única de emitir electrones cuando un cuanto de luz incide sobre su superficie. Estos electrones son transportados a través de una serie de placas, llamadas dinodos, mediante la aplicación de un elevado voltaje positivo. Cuando un electrón incide sobre un dinodo, se producen varios electrones, que se proyectan hacia el siguiente dinodo, donde vuelve a multiplicarse su número. Cuando los electrones abandonan el último dinodo de la serie, el pulso electrónico es miles de veces mayor que el original. Los electrones son entonces recogidos por el ánodo, que está conectado a un instrumento de medición calibrado. Este tipo de detectores son muy sensibles, y son utilizados fundamentalmente en el entorno de los laboratorios de experimentación.

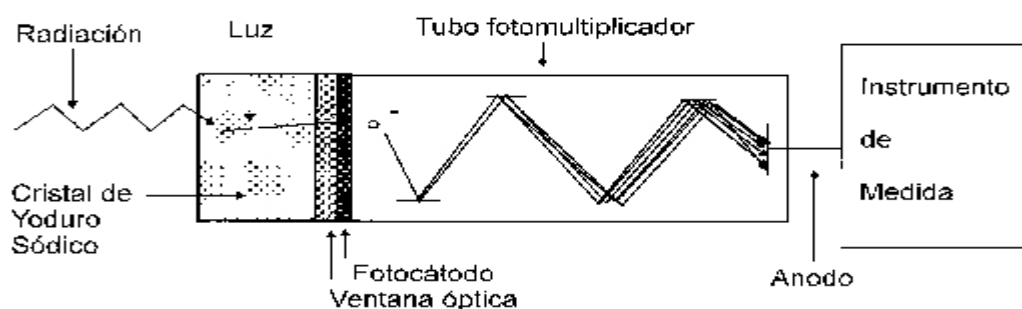


fig 4

b- Unidades de medida

Si la radiación nuclear es una desintegración radiactiva, la unidad de medida más básica es el número de desintegraciones radiactivas que se producen en un período de tiempo. De unidades se usan 2:

- Bequerel: 1 desintegración por segundo
- Curie 1 curie = 37,000,000,000 becquerel = 37 Gigabecquerel (GBq)

Esto no sirve de mucho para medir los efectos de la radiación, es sólo una unidad física. Puede ser más interesante saber, de la radiación emitida, cuanta se absorbe en un tejido o en un aparato electrónico. Para eso se utilizan las unidades de **absorción de radiación**. La dosis absorbida mide la energía depositada en un medio por unidad de masa. La unidad del SI es el Gray= Julios (energía)/Kg (masa) Pero hay otras unidades más antiguas como los Rad o los Roetgens (que miden exposición). No hay conversión "automática" entre Becquerels y Grays porque dependen del material que absorbe la radiación, (no es lo mismo piel que silicio), y del tipo de radiación, (no es lo mismo rayos alfa que gama) Por último, desde el punto de vista de salud, el indicador de radiación es el de la **dosis efectiva**, que se calcula tomando la dosis de absorción de radiación -que acabamos de ver- en todos los órganos y se multiplica por un coeficiente. Estos números no se calculan a mano, sino

que se toman de la descripción de una “persona de referencia” que se hace en la Comisión Internacional de Protección Radiológica. La unidad de referencia es el Sievert, que son Julios/KG. Es decir, sería como medir en Grays pero con un factor de corrección.

El contador Geiger (ni ningún otro) no “mide” en ninguna de estas unidades. El tubo de Geiger está relleno de un gas que se ioniza cuando recibe radiación y simplemente genera un pulso eléctrico cuando esto ocurre. Así que el número al que hay acceso es el de los pulsos o “cuentas por minuto” (CPM) Para pasar de CPM a Bequereles (desintegraciones por segundo) habría que conocer, cómo es de sensible el tubo. Es decir, no es lo mismo que se produzcan 400 desintegraciones en un minuto, a que se detecten todas. Además el tubo sólo detecta radiación gama y beta, no alfa.

-Partículas y mediadores

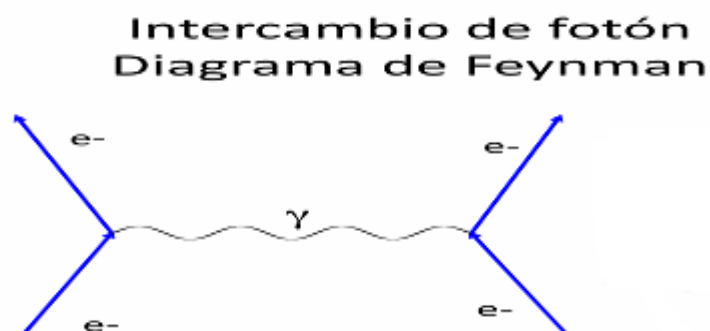
Ahora resumiremos el estado actual de los estudios sobre partículas elementales. A partir de los estudios de Dirac, fue posible establecer un modelo de cómo interactuarán partículas cargadas. La teoría que unifica las ideas del Electromagnetismo, Mecánica Cuántica y la Relatividad se denomina Electrodinámica Cuántica (QED).

La idea general es que cuando dos partículas interactúan, en lugar de ejercerse fuerzas en forma instantánea, lo hacen intercambiando una partícula “mediadora “.Un ejemplo de esto es suponer dos patinadores, sobre una pista de hielo, alejados uno de otro. Si uno de ellos arroja una pelota al otro, éste retrocederá por efecto del impacto con el balón y el lanzador también retrocederá debido al impulso que le transmitirá la pelota (recordar el Teorema de Impulso y cantidad de movimiento). La pelota sirve de “mediadora “ entre los dos patinadores. La fuerza que se ejercen de manera indirecta no se aplica instantáneamente ya que la pelota viaja a velocidad finita.

Aunque el ejemplo no es aplicable en la QED, permite dar una idea del proceso de interacción.

En el caso del Electromagnetismo, la partícula mediadora es el fotón. Al encontrarse dos partículas cargadas (ya sean electrones o protones) en el espacio, se ejercen fuerzas de repulsión o atracción, intercambiando un fotón .Es una interacción de largo alcance puesto que el fotón no tiene masa y puede propagar la fuerza a grandes distancias.

Esta interpretación debe ser tomada con cuidado, recordando la limitación impuesta por el principio de incerteza, al determinar que no puede definirse una trayectoria clásica en el mundo cuántico. Pero permite dar una idea de los fenómenos de interacción. Se puede realizar un diagrama para visualizar la idea. Se los denomina en general diagramas de Feynman. (Apéndice 3). En el ejemplo nombrado de la interacción electrón-electrón, el diagrama sería:



Por otro lado, al fotón constituía parte de la familia de los llamados bosones (por cumplir la estadística de Bose-Einstein)

Ya hemos hablado de la fuerza nuclear, que no hay que confundir con la fuerza fuerte, porque no es una interacción fundamental, sino el residuo, a bajas energías, de la verdadera fuerza fuerte. Basándose en la teoría de intercambio de partículas virtuales, que funcionaba muy bien para ele

electromagnetismo, el físico japonés Hideki Yukawa, propuso en 1935 que la interacción nuclear estaba mediada por una partícula que llamó el mesón π o pión, cuya función en la teoría era similar a la del fotón en la Electrodinámica, aunque con una gran diferencia: debía tratarse de una partícula masiva. En efecto, Yukawa propuso que la teoría de la interacción nuclear debía ser, como la Electrodinámica y la Gravitación, una teoría de campos. Pero es un hecho que, a distancias macroscópicas, no experimentamos más que fuerzas electromagnéticas y gravitatorias.

Entonces, la fuerza nuclear debía ser una fuerza de muy corto alcance, a diferencia de las otras dos fuerzas conocidas por entonces, que tienen un alcance infinito. De esta condición, estimó que la masa del pión debía ser unas 300 veces la masa del electrón. De ahí proviene el nombre de mesón.

La propuesta de Yukawa era una mera especulación hasta que dos grupos experimentales identificaron, en experimentos con rayos cósmicos realizados en 1937, partículas con características similares a las que debería tener la partícula de Yukawa. Pero existían algunas inconsistencias. Hubo que esperar hasta después de la segunda guerra (1947) para comprender que solo una de esas partículas era, efectivamente, un mesón π . Pero la otra tenía características similares a las del electrón (no participaba en la interacción nuclear). A esta última se la conoce como partícula μ o muón. Interactúa exactamente igual que el electrón, como el electrón tiene espín $1/2$, pero su masa es unas 200 veces la masa del electrón.

Posteriormente medidas mostraron que, además, existían tres tipos de mesones π , todos ellos bosones (espín entero), pero que participaban de distinto modo en la interacción electromagnética, según su carga eléctrica (π^+ , π^0 y π^-), donde los supraíndices tienen significado evidente.

Se podría decir que a los inicios de la década de los 50, se comenzó a clasificar las partículas conocidas en dos tipos

- a leptones : partículas livianas, no afectadas por la interacción nuclear(electrón, muón , neutrino) , de espín $\frac{1}{2}$ y
- b hadrones : partículas más masivas que si participan de la interacción nuclear (protón, pión), de espín $\frac{1}{2}$

a- Estudiando los leptones y los decaimientos, resultó que aparecían de a pares y que no había una sola clase de neutrino.

Pronto se midieron otros procesos que sólo podían ser explicados por la presencia de un neutrino o de su antipartícula, el antineutrino. En primer lugar, el proceso llamado desintegración β inversa

$$\nu + n \rightarrow p^{(+)} + e^{(-)} \quad (1)$$

Además:

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu} \quad (2)$$

$$\pi^+ \rightarrow \bar{\mu} + \nu \quad (3)$$

La pregunta natural es la siguiente: ¿es el antineutrino $\bar{\nu}$ igual al neutrino ν ? Podría bien ocurrir, ya que el neutrino no tiene carga eléctrica, que fuese su propia antipartícula. Para responder a esta pregunta, se buscó producir la reacción

$$\bar{\nu} + n \rightarrow p^{(+)} + e^{(-)} \quad (4)$$

similar al proceso beta inverso. Pero la conclusión fue que esta reacción no ocurre (en realidad, se establecieron cotas compatibles con cero para la probabilidad de que ocurra).

Se postuló, entonces, la existencia de un nuevo número cuántico conservado aditivo (como lo es la carga eléctrica), llamado número leptónico y anotado por L . El electrón, el muón y ambos neutrinos tienen $L = 1$, mientras sus antipartículas tienen $L = -1$.

Visto que debe conservarse, la suma de los números leptónicos en el estado inicial debe coincidir con la suma de números leptónicos en el estado final. Eso impone que reacciones como la (4) estén prohibidas y que puedan ocurrir todas las restantes que escribimos hasta ahora.

Pero, además, el neutrino de (1) no es el mismo que el de (3). Los distinguimos llamándolos, respectivamente, neutrino del electrón (ν_e) y neutrino del muón (ν_μ). Experimentalmente, se observó que el proceso (muón que se transforma en electrón, emitiendo radiación)

$$\mu \rightarrow e^{(-)} + \gamma$$

no existe. Obsérvese que la conservación de L no lo prohíbe. Para explicar por qué no ocurría fue necesario introducir dos diferentes números leptónicos: del electrón (L_e) y del muón (L_μ), cada uno de ellos conservado en forma independiente y, por supuesto, tales que

$$L_e + L_\mu = L.$$

Además, $L_e = 1$ para el electrón y su neutrino, $L_e = -1$ para sus antipartículas, $L_e = 0$ para el muón, su neutrino y todas sus antipartículas y mutatis mutandi, para la familia del muón.

b-Estudiando los hadrones se los clasificó al principio en dos clases: bariones (espín semientero y propiedades similares al protón) y los mesones (espín entero y semejantes a los piones). Los bariones seguían leyes similares a los leptones, y se los etiquetó mediante el correspondiente número bariónico B , que es 1 para los bariones y -1 para los antibariones. A diferencia de ellos, los mesones tienen $B = 0$, por lo que no se crean de a pares.

Experimentando con los rayos cósmicos se descubrió una partícula, más pesada que el protón y de carga cero, partícula que se llamó Λ . Estudiando su desintegración, emitía un protón y un pión

$$\Lambda \rightarrow p^{(+)} + \pi^{(-)}$$

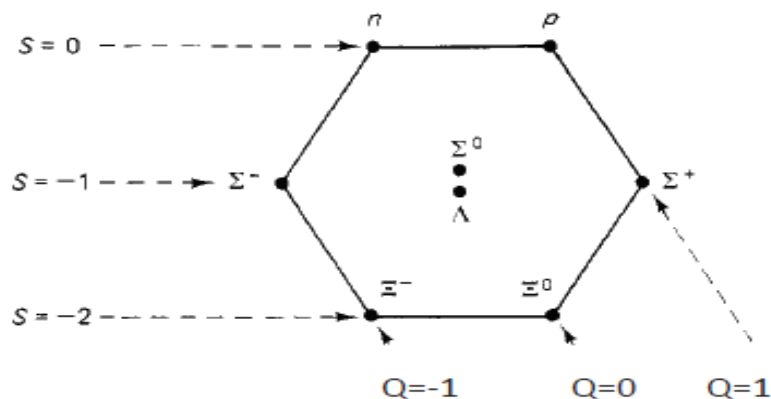
Cumplía con la conservación del número bariónico, pero tenía una propiedad rara: como era un hadrón, se pensaba que se podía producir de a par con su antipartícula, mediante una interacción nuclear. Pero no, el tiempo de su decaimiento era largo, por lo que era debido a una interacción débil. Para explicar este fenómeno se introdujo otra propiedad, la extrañeza S . A Λ se le asignó el valor $S = -1$ y a los otros hadrones y leptones que no tenían esa característica en su decaimiento se le asignó $S = 0$. Las interacciones nucleares y electromagnéticas conservan ese número, pero, en el caso analizado de la partícula Λ no se cumple esa conservación. Se descubrieron otras partículas hadrónicas, los kaones K , de casi la mitad de la masa del protón. Se los clasificó como mesones por su espín y aparecieron cuatro tipos de kaones: $K^{(+)}$ y $K^{(-)}$ con carga positiva y negativa respectivamente y los kaones neutros (sin carga) K^0 y \bar{K}^0 . Cada par de ellos forman un par

partícula-antipartícula. $K^{(+)}$ y K^0 con $S = 1$ y los otros dos con $S = -1$. Se creaban mediante la interacción nuclear.

¿Pero cómo sería posible verificar la existencia de todas las partículas enumeradas? Estudiar sólo los rayos cósmicos no era suficiente. Por eso se recurrieron a los aceleradores de partículas para que, con mayor energía se pudiese verificar colisiones o desintegraciones que probaran la existencia de tales partículas (ver Apéndice 4).

Como se observa, lo que había estado preciso hacia fines de la década de 1940, era enormemente complicado a mediados de la década de 1960. Era necesario el equivalente de Mendeleev, que pusiera cierto orden en el nuevo conjunto de partículas descubiertas, estableciendo una especie de tabla periódica, no ya para los núcleos, sino para los hadrones. Los Mendeleev de los hadrones fueron Murray Gell-Mann (1929-) y Yuval Ne'eman (1925-2006). Gell-Mann llamó a su esquema "La octuple senda", una expresión tomada de las enseñanzas de Buda, quien enunció ocho modos de proceder para conseguir el fin del sufrimiento mediante la superación de la ignorancia. El nombre hacía también referencia a los grupos de ocho partículas con características similares en que podían reunirse algunos de los bariones y, también, algunos de los muchos mesones conocidos.

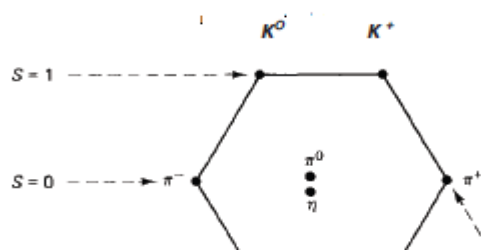
La observación que realizaron ambos científicos fue que los bariones y mesones formaban diagramas muy definidos (multipletes) si se los agrupaba usando como ejes su carga eléctrica y su extrañeza. Por ejemplo, los ocho bariones más livianos, con masas similares, se agrupaban formando el diagrama que se muestra en la figura de abajo



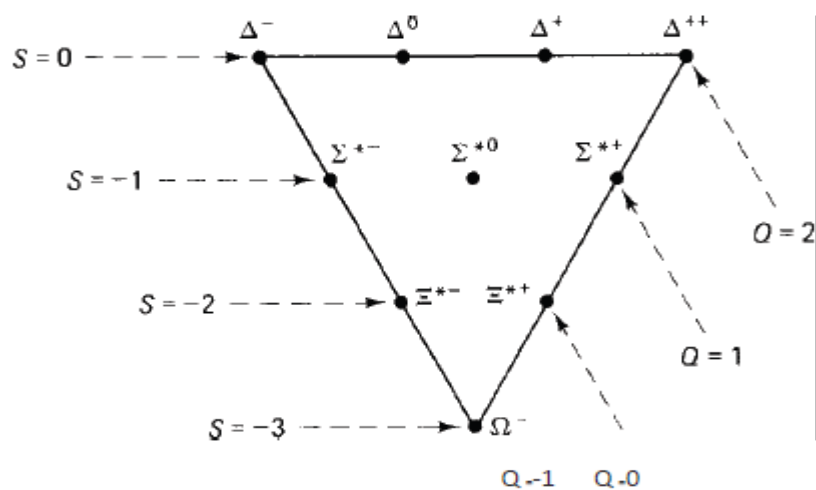
Octuplete de bariones

Este conjunto de partículas se conoce como el octete u octuplete bariónico. Nótese que las partículas con las mismas cargas (en unidades de la carga del protón) se encuentran sobre las mismas diagonales. Las líneas horizontales, en cambio, contienen partículas con la misma extrañeza.

Los ocho mesones más livianos se agrupan en un diagrama similar, que se ve en la figura siguiente



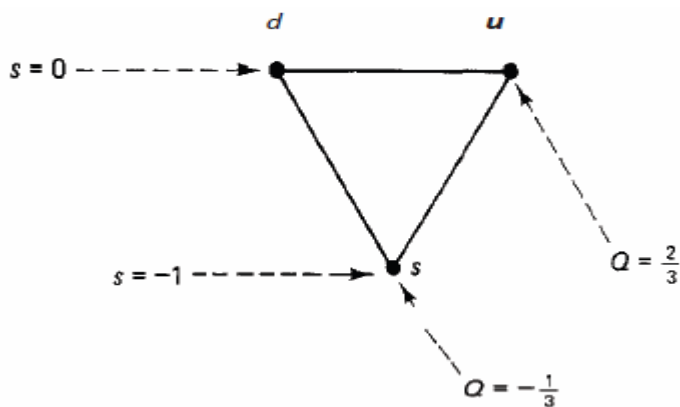
No solo hexágonos existen en el esquema: los diez bariones que siguen en masa se agrupan en un decuplete, como se ve en la figura abajo.



Decuplete bariónico

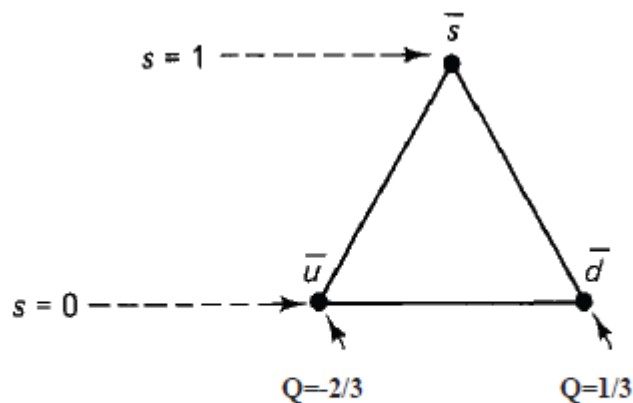
Lo notable es que, también en forma similar a lo que había hecho Mendeleev, al acomodarse estos últimos bariones en el decuplete, la partícula ahora conocida como Ω^- no había sido detectada. Gell-Mann predijo su existencia y cuanto debía valer su masa. La partícula fue, finalmente, detectada en 1964.

Como ocurrió mucho antes con la tabla periódica, la Octuple senda dio origen a la pregunta: ¿por qué se portan los hadrones de modo tan regular, ¿por qué se reúnen en estos curiosos diagramas? La tabla periódica debió esperar muchos años hasta que se desarrollara la Mecánica Cuántica y, de la mano de este desarrollo y del principio de exclusión de Pauli se la obtuvo en muy pocos años: ya en 1964, el mismo Gell-Mann y Stephan Zweig (1881-1942) propusieron, de manera independiente, que todos los hadrones conocidos por entonces estaban compuestos por partículas más elementales: los quarks. Los quarks existían en tres tipos, o sabores, caracterizados por su carga eléctrica y su extrañeza, formando un diagrama triangular como el que se muestra a continuación.



Los quarks

El quark up (u) lleva carga $2/3$ y extrañeza cero; el quark down (d) tiene carga $-1/3$ y extrañeza cero; el s, llamado quark extraño, tiene carga $-1/3$ y extrañeza $S = -1$. A cada quark q corresponde un antiquark \bar{q} , con ambos números cuánticos (carga eléctrica y extrañeza) cambiados de signo, como se muestra en la figura



Los antiquarks

El modelo de quarks afirma que:

- Cada barión está compuesto por tres quarks (cada antibarión está compuesto de tres antiquarks). Por ejemplo, un protón está compuesto por dos quarks u y un quark d.
- Cada mesón está compuesto por un quark y un antiquark. Por ejemplo, el pión π^+ está compuesto por u y \bar{d} .

Con estas reglas es cuestión de simple aritmética construir los diversos hadrones que forman, por ejemplo, el octete de mesones y el decuplete de bariones. Por ejemplo: tres quarks u tendrían carga total $+2$ y extrañeza cero. Esa es la partícula Δ^{++} . Algo similar ocurre con las posibles combinaciones

quark-antiquark, que reproducen el octete mesónico. Pero hay una combinación, $s \bar{s}$, que corresponde a una novena partícula que no está en el hexágono. Se trata de un tercer mesón, aparte del π^0 y del η , con ambos números cuánticos nulos. Tal partícula fue, efectivamente, detectada y se llama la partícula η' . Explicar el octete bariónico es más complicado, porque requiere tener en cuenta, además, los espines, pero funciona igualmente bien. Efectivamente, todos los multipletes de la octuple senda que tienen masas más grandes pueden explicarse mediante estados excitados. Obsérvese que hay ciertos hadrones cuya existencia sería incompatible con el modelo de quarks. Por ejemplo: no puede haber un barión con $S = 0$ y $Q = -2$: no existe combinación de tres quarks que de por resultado esos números. Tampoco puede haber un mesón de carga $+2$, como la del barión Δ^{++} o de extrañeza -3 , como el barión Ω^- . Durante mucho tiempo se realizó una intensa búsqueda de estas partículas “exóticas”, pero no se encontró ninguna.

Las partículas que, hasta 1964, parecían ser partículas elementales (en particular, el protón y el neutrón), comenzaban a pensarse como compuestas de otras más elementales, los quarks. La construcción precisa de todos los hadrones a partir de quarks está fundada en el uso de la teoría de grupos que, como veremos más adelante, aparece toda vez que existe una simetría. El grupo de simetría en que se funda la octuple senda es el grupo $SU(3)$. Suele llamárselo grupo $SU(3)$ de sabor, para distinguirlo del grupo $SU(3)$ de color, sobre el cual está basada la teoría que explica la dinámica de los quarks. (ver Apéndice 5)

En esta etapa inicial del modelo de quarks se dice, entonces, que los quarks existen en tres especies o “sabores”: u , d , s .

Pero hay un detalle inusual: al cabo de más de 40 años, nadie ha detectado un quark libre. Si el protón, por ejemplo, está compuesto de tres quarks, podría pensarse que, actuando con suficiente energía, los quarks deberían aparecer después de la colisión como partículas libres. Pero no es el caso. Si se produjeran, serían muy fáciles de detectar, debido a su carga fraccionaria, que los hace únicos. Pero ningún quark libre ha sido detectado jamás. A este fenómeno se lo conoce como confinamiento de los quarks y una tarea pendiente para los físicos teóricos consiste en mostrar de modo analítico que la Cromodinámica Cuántica (QCD, teoría de las interacciones fuertes entre quarks), conduce, en su límite de bajas energías, al confinamiento.

Otra dificultad con el modelo de quarks se presentó al tratar de interpretarlo sobre la base del principio de exclusión: los quarks debían tener spin $1/2$ para poder, con tres de ellos, construir un barión, que también tiene spin $1/2$ o $3/2$, resultando que la partícula Δ^{++} debía consistir de tres quarks idénticos, en el mismo estado, violando el principio de exclusión. Para resolver esta dificultad se propuso la existencia de otro número cuántico: el “color”. Por cada sabor de quark, existían tres “colores”. Así, los tres quarks que integran Δ^{++} pueden coexistir con todos los restantes números coincidentes, pero distintos valores de la carga de color. Tal carga de color es la consecuencia de una nueva simetría, cuyo grupo asociado es también $SU(3)$. Se la llama simetría de color y se agrega al modelo de quarks un tercer postulado:

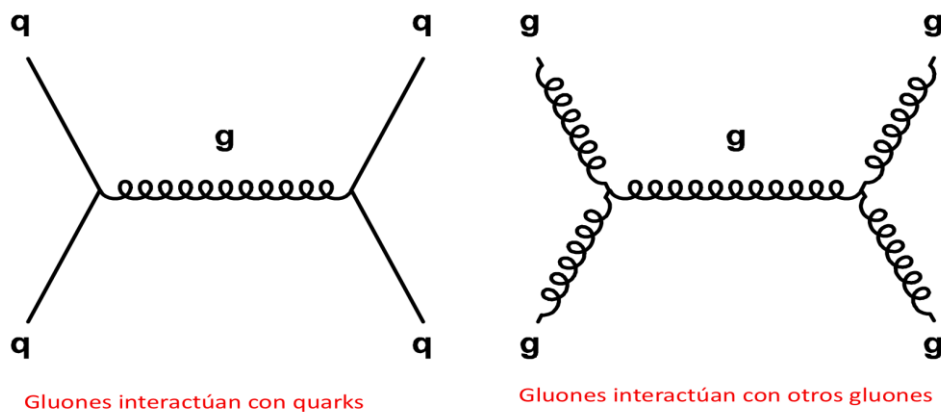
- Todos los hadrones tienen carga de color nula (las tres cargas deben aparecer en la misma proporción).

El color es el equivalente a la carga eléctrica del electromagnetismo en el caso de la interacción fuerte. Esta interacción es la verdadera interacción fundamental entre quarks, que sustituye a la antigua fuerza nuclear. Actualmente sabemos que la interacción nuclear no es una interacción fundamental, porque los nucleones no lo son. En cambio, las partículas elementales son los quarks, de los cuales están formadas todas las partículas que interactúan fuertemente, los hadrones. La interacción fuerte, tal como la entendemos ahora es una fuerza fuerte entre quarks

Los bariones deben estar compuestos de la superposición antisimétrica de un quark de cada color, lo mismo para los antibariones, compuestos de un antiquark de cada color (con signo negativo) y para los mesones $q \bar{q}$, que tienen carga de color nula, como todas las restantes cargas. Pero no pueden existir partículas formadas por dos o por cuatro quarks, porque su carga de color no podría anularse. A estos tres sabores iniciales de quarks (up (u), down (d), strange (s)) se agregaron, al ser detectados experimentalmente , otros tres: charm (c), top (t) y bottom (b).

La interacción entre quarks se explica como intercambio de mediadores sin masa, que en este caso llevan el nombre de gluones (de glue, pegamento). A diferencia del fotón, que no tiene carga, el gluon tiene color. Por ello, los gluones pueden interactuar entre si, por estar “cargados “ de color.

Fuerza fuerte: gluons



Por lo tanto, la fuerza nuclear del tipo de Yukawa se interpreta como una fuerza efectiva, remanente a bajas energías o, lo que es igual, a grandes distancias, de la QCD, de algún modo similares a las fuerzas de van der Waals, según la teoría efectiva proveniente de la Electrodinámica Cuántica (QED).

Una teoría de campos cuántica y relativista para esta interacción fuerte existe: es la Cromodinámica Cuántica (QCD), basada sobre la simetría de color y con una carga de color asociada. También esta es una teoría de gauge, y fue desarrollada generalizando las ideas que caracterizan a la Electrodinámica Cuántica. En este contexto, debería poder demostrarse que la fuerza nuclear es el residuo, a bajas energías, de QCD. Tal demostración requeriría resolver QCD en regiones donde la constante de acoplamiento se hace muy grande (esclavitud infrarroja) y no puede usarse teoría de perturbaciones.

El otro límite de la QCD (para altas energías), donde la constante de acoplamiento es pequeña (libertad asintótica), arroja predicciones perturbativas en perfecto acuerdo con los resultados de los experimentos de altas energías.

También la interacción débil es explicada por una teoría cuántica relativista de campos de gauge: la teoría de Glashow-Salam y Weinberg, propuesta en la década de 1960. Esta teoría no solo describe la interacción débil adecuadamente, sino que la describe en forma unificada con la interacción electromagnética. Se la conoce como la teoría de las interacciones electrodébiles.

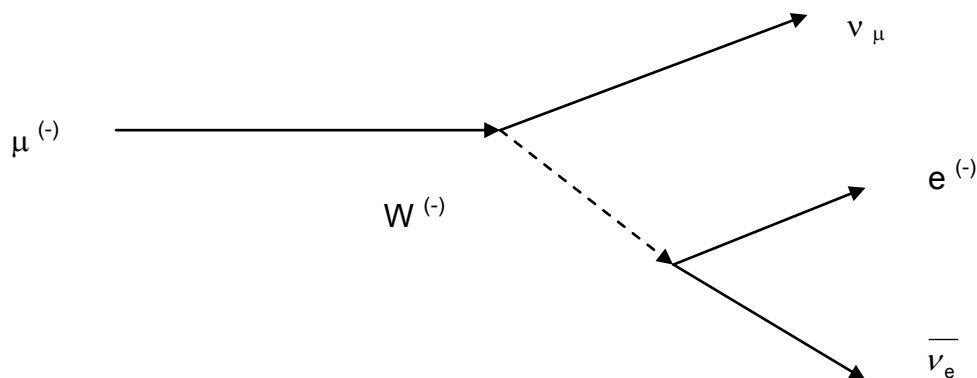
Usando el concepto de mediadores, en el caso de las fuerzas débiles, una diferencia importante con las interacciones fuertes y electromagnéticas es que los mediadores, si son masivos, son de masas del orden de cien veces la del protón. Por eso la intensidad de esta interacción es baja, ya que los

mediadores son de gran masa y solo actúan a corto alcance. Hay dos tipos de partículas mediadoras débiles, también bosones:

-Z , de carga nula, pero con masa , y

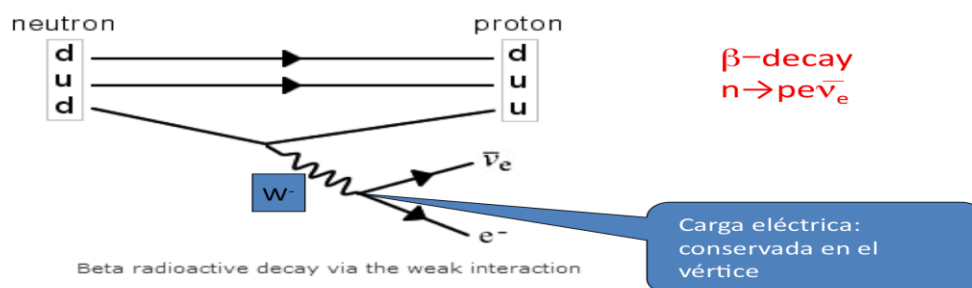
-W, que tiene carga y masa ; a su vez se dividen en W (+) y W (-) , y son responsables de las interacciones donde se produce la transformación de un leptón en su correspondiente neutrino o de un quark de un sabor a otro.

Un ejemplo es el decaimiento de un muón que se transforma en un neutrino y emite un W (-) virtual que rápidamente se convierte en un par electrón-antineutrino electrón , como se muestra en el siguiente diagrama de Feynman.



En el caso de los quarks es interesante entender , mediante la interacción débil, el decaimiento de un neutrón .

Fuerza débil: W^{-}, W^{+}, Z^0



Además de describir procesos débiles que se conocían en la época de su formulación, la teoría predijo la existencia de los llamados procesos de corriente neutra a través de los mediadores tipo Z. Con el mecanismo de Higgs, diseñado para dar masa a Z y W, se predice la existencia de una partícula de espín cero (la partícula de Higgs), y el 4 de julio de 2012, el CERN anunció la

observación de una nueva partícula «consistente con el bosón de Higgs». El 14 de marzo de 2013 el CERN, con dos veces más datos de los que disponía en el anuncio del descubrimiento en julio de 2012, encontraron que la nueva partícula se ve cada vez más como el bosón de Higgs. La manera en que interactúa con otras partículas y sus propiedades cuánticas, junto con las interacciones medidas con otras partículas, indica fuertemente que es un bosón de Higgs. Todavía permanece la cuestión de si es el bosón de Higgs del Modelo estándar o quizás el más liviano de varios bosones predichos en algunas teorías que van más allá del Modelo estándar.

El 8 de octubre de 2013 le es concedido a Peter Higgs, junto a François Englert, el Premio Nobel de Física "por el descubrimiento teórico de un mecanismo que contribuye a nuestro entendimiento del origen de la masa de las partículas subatómicas, y que, recientemente fue confirmado gracias al descubrimiento de la predicha partícula fundamental, por los experimentos ATLAS y CMS en el Colisionador de Hadrones del CERN".

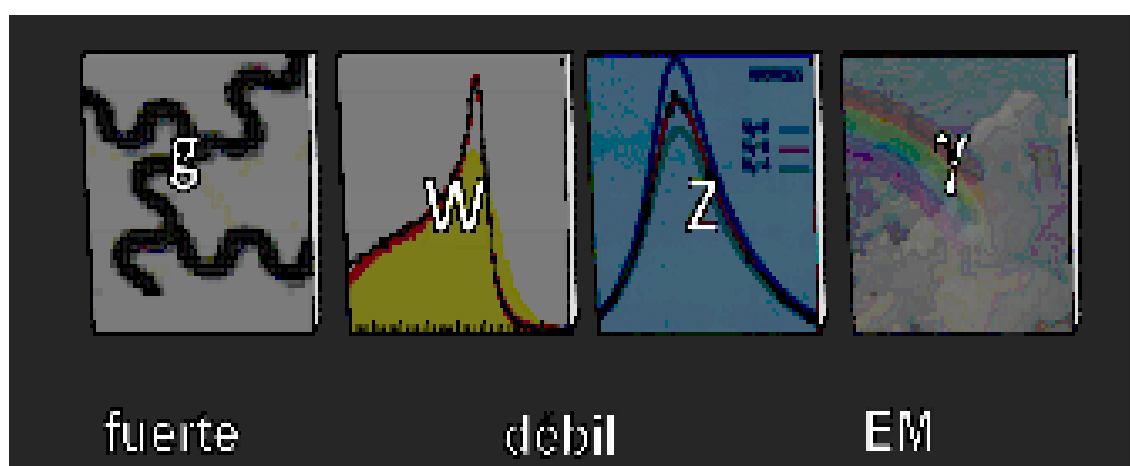
Como ya dijimos también, el modelo de Glashow, Salam y Weinberg contiene demasiados parámetros a ajustar con el experimento, lo cual no es deseable en una teoría fundamental.

Un poco por estas razones y más por cumplir con el sueño de unificación del que Maxwell fue precursor, se han propuesto diversas teorías que unifican las interacciones electrodébiles y las fuertes.

Resumiendo

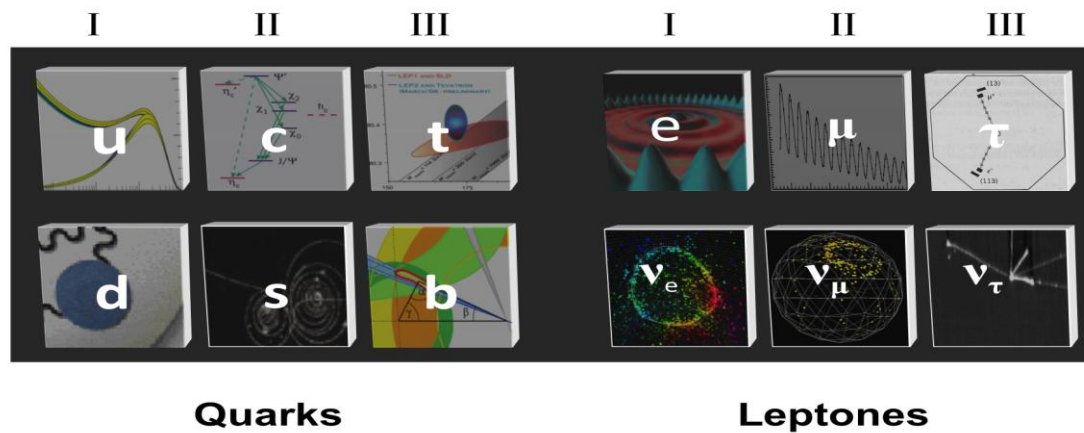
-Mediadores

Fuerzas y bosones mediadores



-Partículas elementales

Partículas de materia



-Debajo aparece una gráfica donde se resume todas las partículas elementales y mediadores que se conocen hasta el día de hoy

El Modelo Estándar

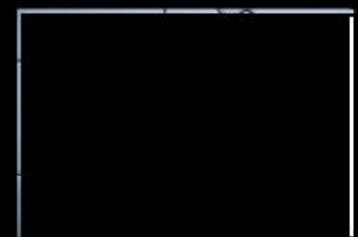
Quarks



Fuerzas



Leptones



III- CONCEPTOS DIDACTICOS DESARROLLADOS

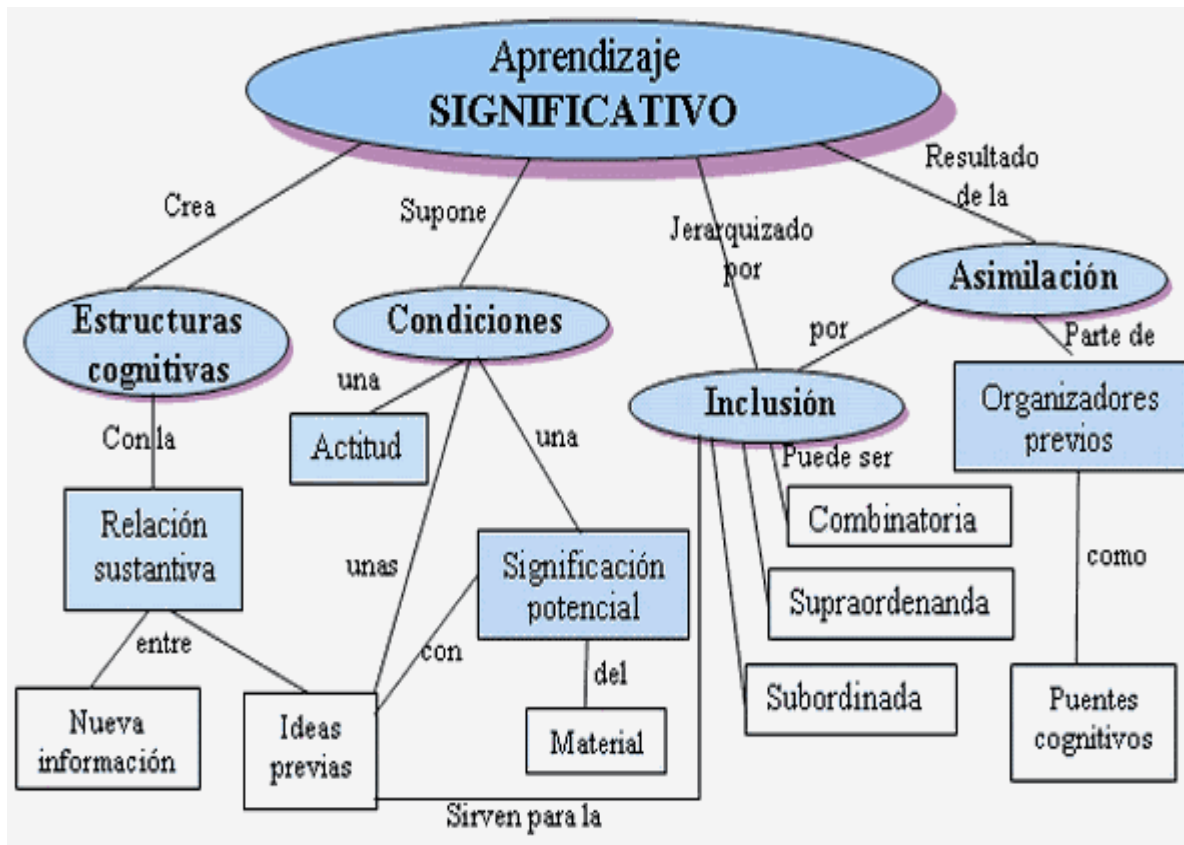
Desde el punto de vista didáctico la metodología por usar estaría enmarcada dentro de lo llamado Aprendizaje Significativo, tema sobre el cual ha trabajado David Ausubel ²⁰. Según este psicólogo y pedagogo, el aprendizaje depende de la llamada "estructura cognitiva" previa del alumno, entendiéndose por estructura cognitiva al conjunto de conceptos e ideas que el sujeto tiene de cierto campo del conocimiento y su organización. Según Ausubel

- "Un aprendizaje es significativo cuando los contenidos son relacionados de modo no arbitrario y sustancial (no al pie de la letra) con lo que el alumno ya sabe. Por relación sustancial y no arbitraria se debe entender que las ideas se relacionan con algún aspecto existente específicamente relevante de la estructura cognoscitiva del alumno, como una imagen, un símbolo ya significativo, un concepto o una proposición " ²¹.
- "El aprendizaje significativo ocurre cuando una nueva información "se conecta" con un concepto relevante ("subsensory") preexistente en la estructura cognitiva, esto implica que, las nuevas ideas, conceptos y proposiciones pueden ser aprendidos significativamente en la medida en que otras ideas, conceptos o proposiciones relevantes estén adecuadamente claras y disponibles en la estructura cognitiva del individuo y que funcionen como un punto de "anclaje" a las primeras".
- A manera de ejemplo en física, si los conceptos de sistema, trabajo, presión, temperatura y conservación de energía ya existen en la estructura cognitiva del alumno, estos servirán de subsensores para nuevos conocimientos referidos a termodinámica, tales como máquinas térmicas, ya sea turbinas de vapor, reactores de fusión o simplemente la teoría básica de los refrigeradores; el proceso de interacción de la nueva información con la ya existente, produce una nueva modificación de los conceptos subsensores (trabajo, conservación de energía, etc.), esto implica que los subsensores pueden ser conceptos amplios, claros, estables o inestables. Todo ello depende de la manera y la frecuencia con que son expuestos a interacción con nuevas informaciones. En el ejemplo dado, la idea de conservación de energía y trabajo mecánico servirá de "anclaje" para nuevas informaciones referidas a máquinas térmicas, pero en la medida de que esos nuevos conceptos sean aprendidos significativamente, crecerán y se modificarán los subsensores iniciales; es decir los conceptos de conservación de la energía y trabajo mecánico, evolucionarían para servir de subsensores para conceptos como la segunda ley termodinámica y entropía.
La característica más importante del aprendizaje significativo es que, produce una interacción entre los conocimientos más relevantes de la estructura cognitiva y las nuevas informaciones (no es una simple asociación), de tal modo que éstas adquieren un significado y son integradas a la estructura cognitiva de manera no arbitraria y sustancial, favoreciendo la diferenciación, evolución y estabilidad de los subsensores pre existentes y consecuentemente de toda la estructura cognitiva".

En el esquema siguiente resume esta teoría didáctica

²⁰ <http://www.educainformatica.com.ar/docentes/tuarticulo/educacion/ausubel/index.html>

²¹ Ausubel (1983 : 18)



Con todo lo anterior como marco teórico, la propuesta de utilizar el cine como metodología de aprendizaje serviría como, dice Ausubel, punto de anclaje de conocimientos. ¿ En qué nos basamos para la anterior afirmación?.

Desde niños los alumnos viven en un mundo donde los estímulos audiovisuales interactúan con ellos todo el tiempo. Por eso, al llegar a la Universidad, mayormente uno de los problemas con que se enfrentan los docentes de las materias científicas es que dichos alumnos acceden con una comprensión deformada de la realidad debido a que, dentro de esos estímulos audiovisuales, el cine les presenta situaciones alejadas muchas veces de los conceptos de la Física a raíz de los efectos especiales. Eso generará en el adolescente preconceptos que, para los profesores, son difíciles de erradicar. Algunos ejemplos de ello pueden ser:

- las situaciones cómicas entre el Coyote y el Correcaminos, muy alejadas de las leyes físicas
- en el film Máxima velocidad (Speed) , el autobús, que viene a toda velocidad, salta horizontalmente, de un extremo a otro, un paso elevado de 15 m sin caer
- ciertas afirmaciones que se dan en Los Simpson cuando Homero comenta que provocó tres fundiciones del núcleo del reactor y un Síndrome de China

Basándonos sobre la teoría de Ausubel, lo audiovisual genera conocimientos previos que sirven como ancla de los nuevos. Pero por lo comentado, muchas veces esos conocimientos previos son incorrectos.

Por ese motivo, la Academia de Ciencias de los EEUU , en la década del 2010, ha desarrollado el programa Science and Entertainment Exchange, en un intento de converger la ciencia correcta con el entretenimiento bien realizado. Entre sus asesores cuenta, además de científicos, con personalidades del cine de la valía de Dustin Hoffman, Jerry Zucker y Seth Mac Farlane. Al mismo tiempo han aparecido series relativas al tema científico, como Big Bang, cuyo trasfondo es desarrollado por el profesor David Salzberg de la Universidad de California (UCLA).

Hay proyectos educativos basados sobre el impacto del uso del cine en la enseñanza. Por ejemplo, en España, el llamado Física de Película (FdP) en la Universidad de Granada aplicado en los cursos 2009-2010 y 2010-2011. Consiste en el uso de fragmentos de películas para su uso en Física como elemento didáctico, como material de ayuda al docente²². De todos los ejemplos posibles, se hizo una selección de fragmentos de entre 10 segundos a 3 segundos de duración.

Película	Escena	Apartados que ilustra
La Amenaza de Andrómeda	Investigación del organismo patógeno	Método científico: observación, experimentación, hipótesis, verificación
Speed 2	Frenado del buque antes de chocar	Aceleración media
Spiderman	El Duende Verde sujeta un funicular	Dinámica. Descomposición de fuerzas. Segunda Ley de Newton
Bart contra Australia (Los Simpson)	Desagües girando en sentidos distintos	Fuerzas ficticias. Fuerza de Coriolis
Goldeneye	James Bond salta haciendo bunting	Energía cinética y potencial
El Mundo Nunca es Suficiente	La lancha de 007 gira en el aire	Par de fuerzas. Velocidad angular
La Espía que me Amó	Coche submarino	Flotabilidad. Principio de Arquímedes
Volcano	Aumento de la temperatura en el estanque del Parque MacArthur	Calorimetría. Calor específico
Enemigo Público	Entrada en "la jaula"	Electrostática. Jaula de Faraday
Tango y Cash	Huida por un cable eléctrico	Potencial eléctrico y corriente
Avatar	Presentación del inobtanio	Magnetismo. Diamagnetismo
La Ventana Indiscreta	James Stewart mira por el teleobjetivo	Óptica. Reflexión en superficies esféricas
Master and Commander: al Otro Lado del Mundo	Observación mediante catalejos	Óptica geométrica. Aberraciones
Contact	La doctora Arroway frente al VLA	Óptica ondulatoria.
Enemigo Público	Observación desde satélites	Óptica ondulatoria. Resolución: criterio de Rayleigh

Otro aporte está en el artículo ““ Physics in Films “ : a new approach to teaching science” de C.Efthimiou y R. Llewellyn, de la University of Central Florida. En ese artículo se analiza el uso de otros filmes, entre ellos Fuera de Control 2 (Speed 2) dónde se observa la escena del choque entre

²² Arturo Quirantes Sierra. Física de Película : una herramienta docente para la enseñanza de la Física Universitaria. Revista Eureka sobre Enseñanza y divulgación de las Ciencias. 2011. Universidad de Granada

un crucero con muelles y otros botes y se muestra a las personas siendo impulsadas hacia delante. Al mismo tiempo hay frecuentes vistas de un velocímetro digital, y medidas, en el puente. Se supone que la escena es en tiempo real. Con esto, permite aplicar conceptos de Cinemática lineal.

En otro artículo²³ se analizó la serie Cosmos 1999 y sus errores desde el punto de vista físico. Es una serie de TV, emitida en la década de los 70. La premisa de la serie era la siguiente: allá en el "futuro" (1999), se construye en la Luna una pequeña estación (Base Lunar Alfa) y se utilizaba al satélite terrestre como un depósito de residuos radiactivos. Por accidente y por mala gestión, los materiales radiactivos alcanzan su masa crítica, produciendo una brutal detonación nuclear que saca a la Luna de su órbita, lanzándola hacia lo desconocido. En muchos episodios, la Luna pasaba cerca de un planeta habitable y los protagonistas hacían una visita.

En su momento la serie tuvo su éxito. Pero la idea base de toda la serie tiene un error de proporciones astronómicas (y nunca mejor dicho). ¿A qué velocidad viaja la Luna para acercarse a un planeta desconocido en cada episodio? La estrella más cercana (sin contar el Sol, claro) está a unos 4,22 años luz. ¿Viaja la Luna a velocidades mayores que la luz? Difícilmente se podría acelerar un objeto astronómico de esa manera, aun suponiendo que no fuera imposible por la Relatividad Especial. Y en ese caso, ¿cómo van y vienen al planeta? ¿Tienen las Águilas (las naves de la base) capacidad para superar la velocidad de la luz? Entonces ¿por qué no se vuelven tranquilamente a la Tierra?. Este telefilm serviría como un posible estudio de la influencia de la fuerza gravitatoria, de la Teoría de la Relatividad y de la Física Nuclear.

²³ <http://www.malaciencia.info/2006/02/espacio-1999.html>

IV- CONCEPTOS SICOLÓGICOS

En diferentes artículos, muchos sicólogos y sicopedagogos han ponderado el uso de las imágenes en la enseñanza a todo nivel. Los siguientes son extractos de conferencias sobre el tema en los que fundamenta la utilización de la imagen y su poder en la actualidad, dictadas en el Congreso VII ENAPOL, “El imperio de las imágenes “, desarrollado en Brasil en el 2015

En una de las conferencias, Beatriz Udenio comenta que a los 7 años, irrumpió en la vida familiar la presencia de un hermano varios años mayor que ella, causando una brusca caída de su versión del “imperio de la dicha” - y una coincidencia hizo que entrara a la casa el primer televisor : “la TV”. “*Frente a LA TE VE, comencé a imaginar ser la encantadora heroína que conquistaría al Llanero solitario, o ganaría el corazón de Maverick. O una amorosa dueña de Lassie y, por qué no, una valiente cuidadora de Rintintin. Me embobaban las anacrónicas – ¡sí que lo son!- “Papá lo sabe todo”... “Pero es mamá quien manda” Y las de superhéroes – ¡qué pasión!- Superman, Batman, La mujer maravilla Vivía sumergida en la curiosa paradoja de la imagen: que puede engatusarnos de mil maneras, hasta inventar, soñar, especular, que lo que se ve se imagina es lo que se es y lo que se dice de lo que se es. Es lo que este recurso de la infancia me permitió “.*

En otra de las conferencias se comentó que los registros de las primeras pictografías de las cavernas rupestres, indican que la imagen forma parte de la vida del ser hablante. Ciertamente, fue la importancia de la imagen y su relación con la luz lo que llevo a Aristóteles, en el siglo IV, a descubrir el principio de la cámara oscura, antecesora de la máquina fotográfica.

El hombre se deleita viendo sus imágenes, las de otros y de los paisajes próximos y distantes. La idea de fijar la imagen y conservarla condujo a Daguerre y Talbot a realizar innumerables investigaciones que inauguraron la posibilidad de fijar una imagen captada por la cámara oscura en una superficie. Muchos avances tecnológicos permitieron posteriormente la invención del cine, de la televisión, de las computadoras y otros dispositivos. Hoy estamos acompañados por pantallas en diferentes dispositivos, en las cuales vemos imágenes variadas, aquellas que nos deleitan y alegran, y otras que nos hacen cerrar los ojos por el horror que provocan. Observamos en las calles, en los ómnibus, en las ciudades, mucha gente caminando como sonámbulos, arrastrando los pies, tropezando con los objetos, mirando fijamente una pequeña pantalla en su mano. ¿Muertos-vivos? ¿*Jorobas del smartphone?*. Escuché recientemente en la radio algunas recomendaciones a los viajeros: ¡¡No olviden mirar los paisajes!! ¡Saquen los ojos de la pantalla!²⁴

²⁴ Algunas preguntas en torno del Imperio de las Imágenes – Maria Silvia G. F. Hanna. Conferencia en el marco del VII ENAPOL , congreso sobre El imperio de las imágenes .2015

V -DESARROLLO DE LA EXPERIENCIA DIDÁCTICA

En el marco descripto, propusimos utilizar el cine como medio didáctico para la transmisión y enseñanza de la Física, en particular la Física Nuclear.

Para ello se seleccionaron tres películas de distintas eras del cine, que tratan el tema de la radiación y la Física nuclear. Dichas cintas cinematográficas fueron procesadas, para poder seleccionar las escenas en que se tratan los temas nombrados.

Con dichas escenas más un conjunto de preguntas antes y después de su pasaje y el desarrollo teórico formal, se trabajó la temática con un curso de Física III, de la Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional la Plata, se plantearon evaluaciones que permitieron comparar los resultados de dicha metodología, contrastándola con otro curso de la materia en que se use una metodología convencional.

Desde sus inicios, el cine fue un motor poderoso de transmisión de ideas, usado como medio de propagación política por muchos países. Recordemos la famosa *El acorazado Potemkin* (en ruso: *Броненосец Потёмкин*, o *Bronenósets Potiemkin*) película muda de 1925 dirigida por el cineasta soviético Serguéi M. Eisenstein. La película reproduce el motín ocurrido en el acorazado Potemkin en 1905, cuando la tripulación se rebeló contra los oficiales del régimen zarista.

“ *El acorazado Potemkin* está considerada como una de las películas propagandísticas más influyentes de todos los tiempos y fue nombrada mejor película de la historia en la Exposición General de Bruselas de 1958. El filme es de dominio público en algunas partes del mundo y se la considera como una de las mejores películas de la historia del cine “²⁵.

No es la única ni Rusia el único país en usar el cine como medio propagandístico. Durante la Segunda Guerra Mundial, EEUU uso la industria cinematográfica de los grandes estudios para mostrar a su país y al mundo los esfuerzos bélicos para ganar a las potencias de Eje. Fue en ese marco, cuando se realizó (pocos años después de finalizada la guerra) el film *The Beginning or the End* (*¿Principio o fin?*) (1947) del director Norman Taurog, y protagonizada por el actor irlandés Brian Donlevy como el general Leslie Groves, el encargado militar del proyecto Manhattan, un sorprendente docudrama de Taurog, referente la bomba atómica: su invención, su desarrollo y los estragos que ya ha causado a la Humanidad. Aunque teñida de un aire propagandístico, por lo reciente de la finalización de la guerra y el triunfo norteamericano, es un interesante relato y el primero referido a la temática nuclear y sus implicancias. El tema fue repetido muchos años después, pero desde otro punto de vista, en *Fat man and Little boy* (*Fabricantes de sombras*) (1989) protagonizada por Paúl Newman como el general Groves. En este film ya no tenía al proyecto Manhattan en sí como centro de la trama, sino la relación entre Groves y el científico Robert Oppenheimer, y como historia secundaria (también tratada en el otro film), el drama sufrido por un técnico que trabajaba en el proyecto y que muere como consecuencia de un accidente al manipular material radiactivo.

Con el advenimiento de la Segunda Guerra y años posteriores ,el cine (y posteriormente su hermana menor, la televisión), trató en diferentes filmes la temática de la energía nuclear , sus consecuencias y efectos, ya sea de manera de biotopics o docudramas (filmes de este tipo son los nombrados anteriormente *The Beginnig or the end*, *Fat man and little boy* , *Madame Curie* (1943) , *Race for the bomb* (1987), *Dia Uno* (1989) , *Copenhague* (2002)) o en forma de Ciencia Ficción (ejemplos son *Godzilla* (1954,1998), *Panic in year zero* (1962), *Dr Strangelove : How I learned to stop worrying and love the bomb* (1964) , *El planeta de los simios* (1968) , la serie *El increíble Hulk* y las películas sobre el personaje , *Los Cuatro fantásticos* y su secuela (2005 y 2006) o documentales científicos sobre el tema como los producidos por la BBC .

²⁵ http://es.wikipedia.org/wiki/El_acorazado_Potemkin

Por todo lo anterior, se percibe la existencia de suficiente material como para que cualquier docente lo seleccione, procese y pueda utilizar para el desarrollo de su clase, siguiendo los lineamientos aquí presentados.

Los alumnos de la actualidad provienen de una sociedad donde lo visual forma parte importante de su vida. Sería una lástima no usar esa herramienta para introducir o desarrollar cualquier temática y particularmente el tema que nos compete, la Física Contemporánea. Para eso se seleccionaron, filmes representativos del tema.

- El film **Madame Curie** trata el tema de la Radiación Nuclear, cómo fueron los orígenes de las experiencias que condujeron a su estudio, el descubrimiento de los primeros elementos generadores de radiación natural, del peligro para la salud que surge de trabajar con elementos desconocidos y, al mismo tiempo, su potencial uso en la Medicina.

CUESTIONARIO SOBRE LAS PELÍCULAS MADAME CURIE Y DIA UNO

FECHA:

ALUMNO:

- ¿Qué suposición había hecho Becquerel en sus experiencias?
 - Una vez planteado el problema, los Curie realizaron mediciones ¿por qué pensaron que estaban mal?
 - ¿Qué propusieron al analizar nuevamente las mediciones?
 - ¿Qué escollo se les presentó a los Curie luego de proponer su teoría?
 - ¿Qué peligro apareció en su trabajo?
 - ¿Qué ventaja vieron en su descubrimiento?
 - ¿Con qué otra teoría contemporánea a los Curie se puede correlacionar su trabajo? ¿Por qué?
-
- El film **Copenhague** ficcionaliza el encuentro entre Bohr y Heisenberg, en el marco de la Segunda Guerra Mundial, en la ciudad que da nombre a la cinta y que trata la discusión entre ambos científicos por los avances en la Física Nuclear, las teorías relacionadas a la fisión atómica y por el uso militar de una bomba atómica

CUESTIONARIO SOBRE LA PELÍCULA COPENHAGEN

FECHA:

ALUMNO:

- ¿Cuál fue la contribución importante de Heisenberg a la física cuántica?
- ¿En qué discrepaban Bohr con Heisenberg?
- ¿Por qué fue importante la formulación de Schrödinger?
- ¿Qué dos científicos muy importantes en el desarrollo de la Mecánica cuántica no son nombrados en el film?
- ¿Qué aportes hicieron dichos científicos?

El film **Día uno** es un docudrama en el que se describe la evolución de la idea de la construcción de la bomba atómica utilizando la fisión nuclear, la carrera entre aliados y alemanes por obtenerla, el

desarrollo del proyecto Manhattan, el manejo de las nuevas tecnologías por los militares, su repercusión, tanto el ámbito científico como civil, y las consecuencias sobre la sociedad científica, del lanzamiento de las bombas en Hiroshima y Nagasaki

CUESTIONARIO SOBRE LA PELICULA DIA UNO

FECHA:

ALUMNO:

- ¿Cómo se obtiene una reacción en cadena?
- ¿Con qué elementos es posible alcanzarla?
- ¿Para qué fueron a consultar a Einstein Leo Szilard y el otro científico? ¿Qué peligro les advirtió Einstein ?
- ¿Cómo se define masa crítica?
- ¿Qué función cumple la pila atómica?
- ¿Por qué fue importante la tarea de Oppenheimer en el proyecto Manhattan?
- Una vez lanzada la bomba atómica, ¿cuáles fueron las reacciones en el mundo científico y político de la época?
- Una vez lanzada la bomba atómica, ¿qué peligro avizó Oppenheimer para la humanidad ?

VI-Resultados

Desde el punto de vista estadístico no fue posible obtener resultados ya que la población de alumnos del curso (diez alumnos) no era lo suficientemente significativa. Se puede comentar el impacto que sobre ellos tuvo el trabajar con los fragmentos de películas. Se notó a los jóvenes muy motivados, se generó un diálogo constante con el docente e interés en profundizar más en los temas desarrollados por los tres filmes.

Como ejemplo, se adjunta las respuestas de uno de los tres cuestionarios planteados (el de Copenhague).

Analizando las respuestas de ese cuestionario, hubo una pregunta que respondieron equivocadamente: ¿En qué discrepaban Bohr con Heisenberg? La mayoría contestó que dicha discrepancia era lo referente a la política de la época (recordar que Heisenberg en su momento trabajo en la Alemania nazi), y en parte es cierta, pero la pregunta se abocaba a sus discrepancias en lo que respecta a la Física .Se proyecta, en particular, ese tramo del film.

Alumno A

Cuestionario sobre la película Copenhague

Fecha.-09-09-2015

Alumno: Gómez García Mariano

¿Cuál fue la contribución importante de Heisenberg a la física cuántica?

Uno de los descubrimiento más importantes de Heisenberg, fue el que publicó en un artículo de 1927, El principio de incertidumbre. En este artículo Heisenberg introdujo el concepto de que es imposible determinar de manera simultánea y con exactitud ilimitada la posición y la cantidad de movimiento de una partícula. El principio de incertidumbre constituye una ruptura acusada con las ideas de la física clásica, donde se supone que, con ingenio y capacidad suficiente, es posible medir simultáneamente la posición y la cantidad de movimiento de una partícula hasta el grado de exactitud que se quiera.

¿En qué discrepaban Bohr con Heisenberg?

La gran discrepancia entre ambos físicos, era el uso de la física y sus conocimientos para el **uso en la guerra**, Bohr, se oponía fervientemente al uso de la energía atómica y la fisión para uso militares en cambio que Heisenberg estaba trabajando en la bomba atómica para el ejército alemán.

¿Por qué fue importante la formulación de Schrodinger?

En enero de 1926, al considerar al electrón como partícula no relativista. Schrodinger había introducido su ecuación de onda y obtuvo con gran éxito los valores para la energía y las funciones de onda para el hidrogeno. Otra característica de la mecánica ondulatoria de Schrodinger fue que esta era más fácil de aplicar a problemas físicos que la mecánica matricial de Heisenberg, por que implicaba una ecuación diferencial parcial muy semejante a la ecuación de onda clásica.

¿Qué dos científicos muy importantes en el desarrollo de la mecánica cuántica no son nombrados en el film?

Wolfgang Ernst Pauli físico Austro-Suizo (1900-1958) y Paul Adrien Maurice Dirac físico británico (1902-1984)

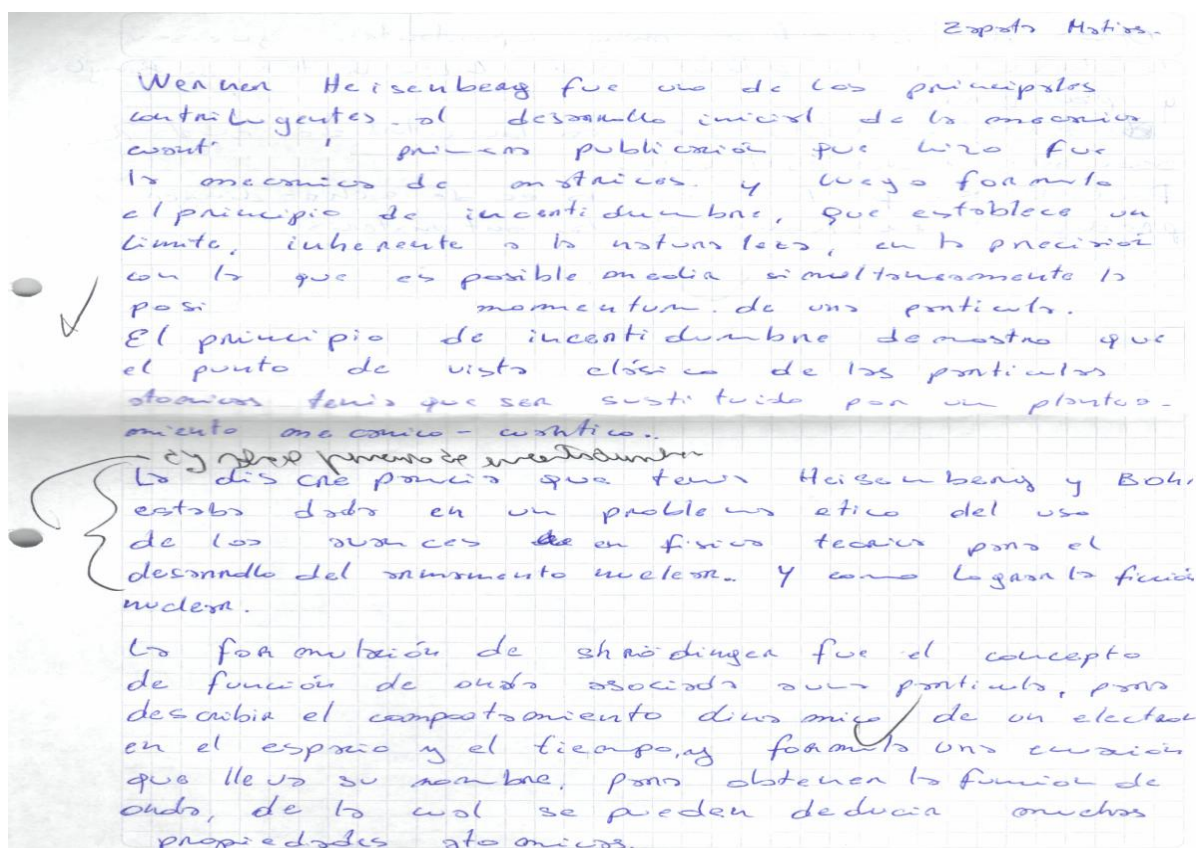
¿Qué aportes hicieron dichos científicos?

Wolfgang Ernst Pauli: Se cuenta entre los padres fundadores de la mecánica cuántica; es suyo el principio de exclusión, según el cual es imposible que dos electrones, en un átomo, puedan tener la misma energía, el mismo lugar, e idénticos números cuánticos.

Paul Adrien Maurice Dirac: En 1926 desarrolló una versión de la Mecánica Cuántica en la que unía el trabajo previo de Werner Heisenberg y el de Erwin Schrodinger en un único modelo matemático que asocia cantidades medibles con operadores que actúan en el espacio vectorial de Hilbert y describe el estado físico del sistema. Por este trabajo recibió un doctorado en física por Cambridge.

En 1928, trabajando en los spines no relativistas de Pauli, halló la ecuación de Dirac, una ecuación relativista que describe al electrón. Este trabajo permitió a Dirac predecir la existencia del positrón, la antipartícula del electrón, que interpretó para formular el mar de Dirac. El positrón fue observado por primera vez por Carl Anderson en 1932. Dirac contribuyó también a explicar el spin como un fenómeno relativista.

Alumno B



VII- Conclusiones

Esta tesina está enfocada en el uso del material audiovisual (específicamente el cine) en el dictado de la Física Contemporánea. Y no es desatinado utilizar esa metodología, pues es justo la rama de la Física que condujo al invento del tubo de rayos catódicos y del láser, tecnologías aplicadas en el desarrollo de la televisión y reproductores de discos DVD's y Blue-ray.

El uso masivo de las tecnologías antes nombradas permite al docente su aplicación ya que está al alcance de la institución en que trabaje y de sus alumnos.

Esta metodología viene siendo estudiada y aplicada en otros países (como he comentado páginas arriba), pero no en los colegios de nivel medio de nuestro país. Por otro lado, los temas de Física Contemporánea no son de fácil enseñanza en los alumnos de escuelas de Nivel Medio, por lo que el uso del cine es una herramienta que los acercaría fácilmente al tema.

Al mismo tiempo, es tarea del docente, al usar películas o dibujos animados, incentivar a sus alumnos a realizar un análisis crítico de lo que están observando, lo que les permitirá aplicar conocimientos previos y alcanzar nuevos conocimientos. He aquí un extracto de un artículo referido al uso del cine como herramienta didáctica:

*“Uno de los mayores problemas con que se encuentran los profesores universitarios de ciencias es el hecho de que los alumnos acceden a la Universidad con una comprensión deformada de la realidad. Este fenómeno puede explicarse, desde una óptica simplista, en virtud de una escasa o incorrecta labor por parte de los docentes preuniversitarios. Pero la realidad es más compleja. El continuo bombardeo de estímulos audiovisuales abrumba y equivoca la percepción del niño, y posteriormente del adolescente, de tal forma que la “realidad” asimilada en el cine y la televisión tiene, en ocasiones, preferencia sobre los razonamientos del aula de ciencias. De no corregirse, la “Física de Hollywood” da lugar a adultos con pocos o nulos conocimientos científicos útiles. En casos extremos, puede desembocar en una concepción de la ciencia como una actividad perversa y peligrosa (Elías 2010). Este proceso constituye, a la larga, un impedimento a un correcto aprendizaje. Por lo general, el estudiante debe tener algún tipo de conocimiento previo que le ayude a “anclar” los conceptos nuevos. Un problema, conocido como impedimento sustantivo, se manifiesta cuando el conocimiento “ancla” es incorrecto. La asimilación de conocimientos nuevos a concepciones previas falsas da lugar a un fallo especialmente dañino en el proceso de aprendizaje, por cuanto no hay constancia siquiera de su existencia: el alumno no sabe, pero cree que sabe. Si las ideas previas son generadas en estudios de cine y televisión, en los que no prima necesariamente el rigor, y son asimiladas por personas que carecen de herramientas para el análisis crítico, acabarán conformando un marco de aprendizaje erróneo “.*²⁶

Las palabras anteriores refuerzan la idea de la tarea que el docente deberá desarrollar al aplicar el cine en sus clases: antes que todo, hacer una selección correcta del film que exhibirá, seleccionar el o los tramos de interés para su clase, analizarlos, organizar cuestionarios que conduzcan a los alumnos a un análisis de lo que ven y que los relacionen con conocimientos previos, para, al final, realizar una puesta en común que genere un nuevo conocimiento.

En la aplicación en clase de los filmes propuestos, desde el punto de vista de análisis estadístico, como he dicho, no se puede aun sacar conclusiones válidas. Sí, desde el punto de vista cualitativo,

²⁶ *Física de Película: una herramienta docente para la enseñanza de Física universitaria usando fragmentos de películas* Arturo Quirantes Sierra. Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias Universidad de Cádiz. APAC-Eureka. ISSN: 1697-011X DOI: 10498/14397 <http://hdl.handle.net/10498/14397> <http://reuredc.uca.es>

al observar en el desarrollo de las clases, mucho entusiasmo y motivación en los estudiantes, con efectos muy positivos en los estudiantes.

Esta metodología, con otros films, ya se está aplicando en mis cursos de Física I en la Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional La Plata , donde observo el mismo entusiasmo y motivación.

Es de notar que en toda la tesina no he utilizado ni propuesto filmes del género de Ciencia Ficción ya que estos no contienen ningún valor desde el punto de vista científico ni didáctico , ya que los temas desarrollados se ven viciados por el uso de efectos especiales y falta de rigor científico.

Por lo tanto

1- durante el 2016 continuaré el trabajo con la metodología propuesta del uso de los filmes mencionados y lograr resultados con validación estadística;

2- esta experiencia puede continuarse seleccionando nuevos films y aplicarse en otros cursos

- Sobre la temática de la aplicación de la energía nuclear

- **El principio o el fin,**
- **Oppenheimer:el padre de la bomba atómica,**
- **Fat man and Little boy ,**
- **La carrera por la bomba**

- Sobre la aplicación de los rayos X :

- **Madame Curie :Hasta dónde los ojos pueden ver.**

3- En el futuro, el objetivo es llevar esta propuesta a establecimientos de nivel medio y terciario. trabajando con los docentes de Física en general, para que aprovechen esta experiencia y así mismo evaluar estadísticamente su eventual éxito

APÉNDICE 1

Líneas de Balmer



El espectro visible en las líneas de emisión del hidrógeno en la serie de Balmer. H-α (alfa) es la línea roja a la derecha. Las dos líneas más a la izquierda son ultravioleta, ya que tienen longitudes de onda inferior a 400 nm.

En física atómica, la **serie de Balmer** es el conjunto de rayas que resultan de la emisión del átomo de hidrógeno cuando un electrón transita desde un nivel $n \geq 3$ a $n = 2$ (donde n representa el número cuántico principal referente al nivel de energía del electrón). Las transiciones son denominadas secuencialmente por letras griegas: desde $n = 3$ a $n = 2$ es llamada H-alfa, 4 a 2 es H-beta, 5 a 2 es H-gama, etc. La longitud de onda, para cada línea de Balmer, se puede calcular mediante la formula de Rydberg:

$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{l^2} - \frac{1}{m^2} \right)$$

donde R_H es la constante de Rydberg para el hidrógeno (aproximadamente $109\,677\text{ cm}^{-1}$, o $1,097 \times 10^7\text{ m}^{-1}$), $l = 2$ y m un entero mayor que 2.

Transición de n	3→2	4→2	5→2	6→2	7→2	8→2	9→2	$\infty \rightarrow 2$
Nombre	H-α	H-β	H-γ	H-δ	H-ε	H-ζ	H-η	
Longitud de onda (nm) ¹	656,3	486,1	434,1	410,2	397,0	388,9	383,5	364,6
Color	Rojo	Azul-verde	Violeta	Violeta	(Ultravioleta)	(Ultravioleta)	(Ultravioleta)	(Ultravioleta)

El fabricante y físico de telescopios Joseph von Fraunhofer (1787-1826) descubrió una serie de líneas oscuras (un espectro de absorción) presente en el espectro solar continuo. Estas líneas de Fraunhofer establecieron la presencia de elementos químicos individuales en el Sol.

El trabajo de Fraunhofer estimuló un gran interés en la espectroscopia y dio lugar al desarrollo de mejores técnicas e instrumentos. Al final del siglo XIX, la espectroscopia había llegado a ser un campo de la física perfectamente desarrollado. Se habían medido con todo cuidado los espectros de la mayoría de los elementos y se contaba con tablas detalladas de longitudes de onda. Pero aun así no se comprendían las razones de la existencia de las líneas espectrales.

En 1885, un maestro de escuela suizo, Johann Jacob Balmer, descubrió una sencilla fórmula matemática que relacionaba las longitudes de onda de las líneas prominentes en el espectro visible y en el cercano al ultravioleta del gas hidrógeno. (El hidrógeno tiene uno de los espectros atómicos más simples.) La fórmula de Balmer para la longitud de onda λ de las líneas de hidrógeno es

$$\lambda = B \left(\frac{m^2}{m^2 - n^2} \right) = B \left(\frac{m^2}{m^2 - 2^2} \right)$$

donde $B=364.56 \text{ nm}$, $n=2$ y m es un entero que toma los valores: 3, 4, 5, 6, ...

Las líneas correspondientes que se observan en el espectro visible del hidrógeno definen la llamada Serie de Balmer.

Con esta fórmula, Balmer calculó las longitudes de onda de las nueve líneas (cuatro visibles y cinco ultravioletas) que entonces se sabía existían en el espectro de hidrógeno. La fórmula de Balmer era estrictamente empírica. Esto significa que no se había deducido de ningún modelo o teoría del comportamiento físico; más bien, Balmer ofreció su fórmula sólo como una relación matemática que era consistente con las observaciones. En apariencia no había razón de por qué debía funcionar. A pesar de eso, proporcionó un cálculo sorprendentemente preciso de las longitudes de onda en el espectro de hidrógeno. Incluso en el peor de los casos, el cual ocurriría para $n=11$, las longitudes de onda calculadas por Balmer estaban dentro de 0,1% del valor medido.

Al dar a conocer su fórmula, Balmer sugirió que quizá fuera un caso especial de alguna fórmula más general que se aplicara a otras series de líneas en otros elementos. El espectroscopista sueco Johannes Robert Rydberg inició entonces la búsqueda de una fórmula con dichas características. En 1889, a partir de la gran cantidad de datos disponibles, Rydberg encontró varias series espectrales que encajaban en una fórmula empírica que él demostró era equivalente a la fórmula de Balmer. La fórmula de Rydberg puede escribirse para producir el recíproco de la longitud de onda de la luz emitida como:

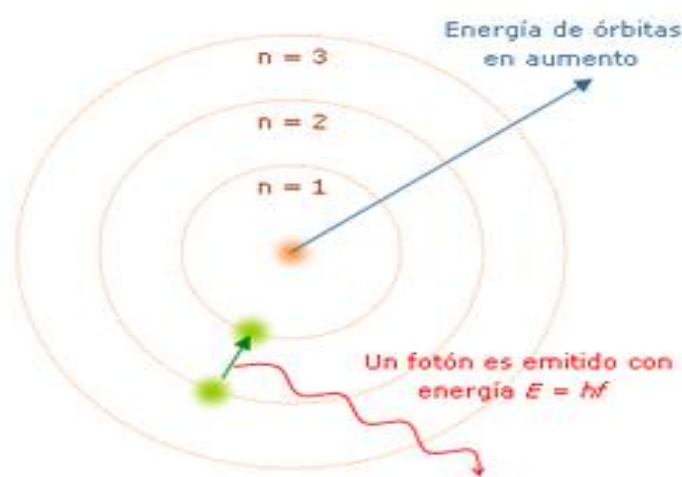
$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right) \quad \text{siendo } n_1 < n_2$$

donde R_H es la constante de Rydberg= $10\,973\,758,306 \text{ m}^{-1}$ y n_1 y n_2 son números enteros. Para la serie de Balmer, $n_1=2$ y n_2 toma los valores de 3, 4, 5, 6... A medida que n_1 se vuelve más grande, las líneas convergen hacia un límite de la serie.

Observaciones ulteriores de otros espectroscopistas confirmaron series espectrales adicionales en el infrarrojo y el ultravioleta para el hidrógeno, lo que correspondía a otros valores de $n_1 = 1, 3, 4$ y 5. En 1900 se sabía que las fórmulas matemáticas podían proporcionar cálculos muy exactos de las líneas espectrales en el hidrógeno. Sin embargo, en relación con la estructura atómica nadie había ideado ningún modelo que explicara la existencia de los espectros observados ni por qué la fórmula de Rydberg funcionaba tan bien.

Modelo atómico de Bohr

El **modelo atómico de Bohr** o de **Bohr-Rutherford** es un modelo clásico del átomo, pero fue el primer modelo atómico en el que se introduce una cuantización a partir de ciertos postulados. Fue propuesto en 1913 por el físico danés Niels Bohr, para explicar cómo los electrones pueden tener órbitas estables alrededor del núcleo y por qué los átomos presentaban espectros de emisión característicos (dos problemas que eran ignorados en el modelo previo de Rutherford). Además el modelo de Bohr incorporaba ideas tomadas del efecto fotoeléctrico, explicado por Albert Einstein en 1905.



Introducción

Bohr se basó sobre el átomo de hidrógeno para hacer el modelo que lleva su nombre. Bohr intentaba realizar un modelo atómico capaz de explicar la estabilidad de la materia y los espectros de emisión y absorción discretos que se observan en los gases. Describió el átomo de hidrógeno con un protón en el núcleo, y girando a su alrededor un electrón. El modelo atómico de Bohr partía conceptualmente del modelo atómico de Rutherford y de las incipientes ideas sobre cuantización que habían surgido unos años antes con las investigaciones de Max Planck y Albert Einstein.

En este modelo los electrones giran en órbitas circulares alrededor del núcleo, ocupando la órbita de menor energía posible o la órbita más cercana posible al núcleo. El electromagnetismo clásico predecía que una partícula cargada moviéndose de forma circular emitiría energía por lo que los electrones deberían colapsar sobre el núcleo en breves instantes de tiempo. Para superar este problema Bohr supuso que los electrones solamente se podían mover en órbitas específicas, cada una de las cuales caracterizada por su nivel energético. Cada órbita puede entonces identificarse mediante un número entero n que toma valores desde 1 en adelante. Este número " n " recibe el nombre de *número cuántico principal*.

Bohr supuso además que el momento angular de cada electrón estaba cuantizado y sólo podía variar en fracciones enteras de la constante de Planck. De acuerdo con el número cuántico principal calculó las distancias a las cuales se hallaba del núcleo cada una de las órbitas permitidas en el átomo de hidrógeno. Estos niveles en un principio estaban clasificados por letras que empezaban en la "K" y terminaban en la "Q". Posteriormente los niveles electrónicos se ordenaron por números. Cada órbita tiene electrones con distintos niveles de energía obtenida, que después se tiene que liberar, y por esa razón el electrón va saltando de una órbita a otra hasta llegar a una que tenga el

espacio y nivel adecuado, dependiendo de la energía que posea, para liberarse sin problema y de nuevo volver a su órbita de origen. Sin embargo no explicaba el espectro de estructura fina que podría ser explicado algunos años más tarde, gracias al modelo atómico de Sommerfeld. Históricamente el desarrollo del modelo atómico de Bohr, junto con la dualidad onda-corpúsculo, permitiría a Erwin Schrödinger descubrir la ecuación fundamental de la mecánica cuántica.

Postulados de Bohr

En 1913, Niels Bohr desarrolló su célebre modelo atómico de acuerdo a tres postulados fundamentales:

Primer postulado

Los electrones describen órbitas circulares en torno al núcleo del átomo sin irradiar energía. La causa de que el electrón no irradie energía en su órbita es, de momento, un postulado, ya que según la electrodinámica clásica una carga con un movimiento acelerado debe emitir energía en forma de radiación.

Para mantener la órbita circular, la fuerza que siente el electrón —la fuerza coulombiana por la presencia del núcleo— debe ser igual a la fuerza centrípeta. Esto nos da la siguiente expresión:

$$k \frac{Ze^2}{r^2} = \frac{m_e v^2}{r}$$

Donde el primer término es la fuerza eléctrica o de Coulomb, y el segundo es la fuerza centrípeta; k es la constante de la fuerza de Coulomb, Z es el número atómico del átomo, e es la carga del electrón, m_e es la masa del electrón, v es la velocidad del electrón en la órbita y r el radio de la órbita. En la expresión anterior podemos despejar el radio, obteniendo:

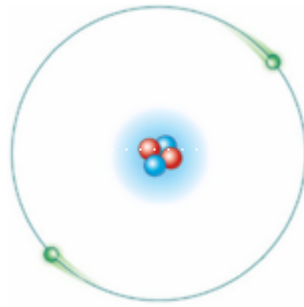
$$r = k \frac{Ze^2}{m_e v^2}$$

Y ahora, con esta ecuación, y sabiendo que la energía total es la suma de las energías cinética y potencial:

$$E = T + V = \frac{1}{2} m_e v^2 - k \frac{Ze^2}{r} = -\frac{1}{2} \frac{kZe^2}{r}$$

Donde queda expresada la energía de una órbita circular para el electrón en función del radio de dicha órbita.

Segundo postulado



No toda órbita para electrón está permitida, tan solo se puede encontrar en órbitas cuyo radio cumpla que el momento angular, L , del electrón sea un múltiplo entero de $\hbar = \frac{h}{2\pi}$

Esta condición matemáticamente se escribe:

$$L = m_e v r = n \hbar$$

con $n = 1, 2, 3, \dots$

A partir de esta condición y de la expresión obtenida antes para el radio, podemos eliminar v y queda la condición de cuantización para los radios permitidos:

$$r_n = \frac{n^2 \hbar^2}{k m_e Z e^2}$$

con $n = 1, 2, 3, \dots$; subíndice introducido en esta expresión para resaltar que el radio ahora es una magnitud discreta, a diferencia de lo que decía el primer postulado.

Ahora, dándole valores a n , número cuántico principal, obtenemos los radios de las órbitas permitidas. Al primero de ellos (con $n=1$), se le llama radio de Bohr:

$$a_0 = \frac{\hbar^2}{k m_e e^2} = 0.52$$

expresando el resultado en angström.

Del mismo modo podemos ahora sustituir los radios permitidos r_n en la expresión para la energía de la órbita y obtener así la energía correspondiente a cada nivel permitido:

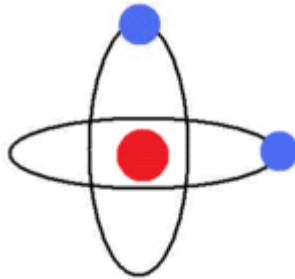
$$E_n = -\frac{1}{2} \frac{k^2 m_e Z^2 e^4}{n^2 \hbar^2}$$

Igual que antes, para el átomo de hidrógeno ($Z=1$) y el primer nivel permitido ($n=1$), obtenemos:

$$E_0 = -\frac{1}{2} \frac{k^2 m_e e^4}{\hbar^2} = -13.6 \text{ eV}$$

que es la llamada *energía del estado fundamental del átomo de Hidrógeno*. Y podemos expresar el resto de energías para cualquier Z y n como:

$$E_n = \frac{Z^2}{n^2} E_0$$



Tercer postulado

El electrón solo emite o absorbe energía en los saltos de una órbita permitida a otra. En dicho cambio emite o absorbe un fotón cuya energía es la diferencia de energía entre ambos niveles.

Este fotón, según la ley de Planck tiene una energía:

$$E_\gamma = h\nu = E_{n_f} - E_{n_i}$$

donde n_i identifica la órbita inicial y n_f la final, y ν es la frecuencia.

Entonces las frecuencias de los fotones emitidos o absorbidos en la transición serán:

$$\nu = \frac{k^2 m_e Z^2 e^4}{2h\hbar^2} \left(\frac{1}{n_i^2} - \frac{1}{n_f^2} \right)$$

A veces, en vez de la frecuencia se suele dar la inversa de la longitud de onda:

$$\bar{\nu} = \frac{1}{\lambda} = \frac{k^2 m_e Z^2 e^4}{2hc\hbar^2} \left(\frac{1}{n_i^2} - \frac{1}{n_f^2} \right)$$

Esta última expresión fue muy bien recibida porque explicaba teóricamente la fórmula fenomenológica hallada antes por Balmer, para describir las líneas espectrales observadas desde finales del siglo XIX, en la desexcitación del Hidrógeno, que venían dadas por:

$$\bar{\nu} = \frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

con $n = 3, 4, 5, \dots$, y donde R_H es la constante de Rydberg para el hidrógeno. Y como vemos, la expresión teórica para el caso $n_f = 2$ es la expresión predicha por Balmer, y el valor medido experimentalmente de la constante de Rydberg ($1.09710^7 m^{-1}$) coincide con el valor de la fórmula teórica.

Se puede demostrar que este conjunto de hipótesis corresponde a la hipótesis de que los electrones estables, orbitando en un átomo, están descritos por funciones de onda estacionarias. Un modelo atómico es una representación que describe las partes que tiene un átomo y como están dispuestas para formar un todo. Basándose sobre la hipótesis cuántica de Planck $E = h\nu$, consiguió cuantizar las órbitas observando las líneas del espectro.

APÉNDICE 2

Formalismo de la mecánica cuántica

A diferencia de la mecánica clásica, donde las ecuaciones nos hablan concretamente de la posición o de la cantidad de movimiento de una partícula, en la formulación de ecuación de Schrödinger se observa que la descripción de un sistema viene dada en términos de la función de onda. Por otra parte, el principio de indeterminación de Heisenberg nos plantea una limitación a la precisión con la que se pueden medir simultáneamente dos magnitudes conjugadas. Teniendo en cuenta estas consideraciones podemos preguntarnos cómo se obtienen los valores posibles de la posición o de la cantidad de movimiento en mecánica cuántica.

Veremos a continuación que estas cantidades se darán en términos de valores probables, o valores esperados de dichas magnitudes, las cuales serán representadas mediante *operadores*. También se dará una serie de elementos matemáticos, sin los cuales no es posible alcanzar una comprensión profunda de la mecánica cuántica.

1- Interpretación probabilística de la mecánica cuántica.

a- Función de onda. Condiciones de existencia

Ya hemos visto que se puede hacer una descripción cuántica mediante una función de onda Ψ , la cual en sí misma no tiene una interpretación física, pero sí la tiene la magnitud $|\Psi|^2$: está relacionada con la probabilidad de encontrar una partícula en cierto lugar del espacio. A la magnitud $|\Psi|^2$, definida por

$$\rho(\vec{r}, t) = |\Psi(\vec{r}, t)|^2 = \Psi(\vec{r}, t) \Psi^*(\vec{r}, t)$$

la llamamos *densidad de probabilidad*, y $|\Psi(\vec{r}, t)|^2 dV$ corresponde a la probabilidad de encontrar a la partícula en la posición \vec{r} en el instante de tiempo t . Ya que Ψ es una función compleja, la forma de calcular $|\Psi|^2$ es efectuar el producto escalar $\Psi \cdot \Psi^*$, donde Ψ^* es la función de onda conjugada.

Al haber definido la densidad de probabilidades $\rho(\vec{r}, t)$ en términos de la función $\Psi(\vec{r}, t)$, debemos imponerles ciertas restricciones a estas funciones para que sean admisibles como solución de la ecuación de Schrödinger. Así, la función $\Psi(\vec{r}, t)$ deberá ser continua y normalizable, lo que implica que debe ser acotada y además, debe tender a cero a medida que \vec{r} tiende a infinito. La condición de normalización se plantea (para una dimensión) mediante

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \psi(x) \psi^*(x) dx = 1$$

Si la función de onda no está normalizada, pero la integral no diverge, o sea, si

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \psi(x) \psi^*(x) dx = C \neq 1$$

la función es normalizable (en este caso, dividiendo a $\Psi(x, t)$ por \sqrt{C}). Por otra parte, debe ser un valor finito, por lo que, la función Ψ , así como su derivada primera, deben ser funciones continuas y derivables en todo punto. Resumiendo:

- $\psi(x)$ debe ser normalizable (esto es, $\psi(x) \rightarrow 0$ cuando $x \rightarrow \infty$)
- $\psi(x)$ debe ser continua y derivable
- $d\psi(x)/dx$ debe ser continua y derivable

b- Ecuación de Schrödinger

Cualquier fenómeno ondulatorio unidimensional representado por la función de onda $y(x, t)$ debe cumplir con la ecuación en derivadas parciales de segundo orden

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \quad (1)$$

siendo v la velocidad de propagación de la onda. Se propone como solución de (1) a la función

$$y = A e^{-i\omega t \left(t - \frac{x}{v} \right)} \quad (2-1)$$

Cuando introducimos en (2) ω y λ para el problema unidimensional de la onda cuántica, en lugar de la función y se reemplaza por la función de Ψ , y proponemos como solución

$$\Psi = A e^{-i2\pi \left(\nu t - \frac{x}{\lambda} \right)} \quad (2-2)$$

siendo ν frecuencia y λ longitud de onda. Relacionando con la energía E y la cantidad de movimiento p ,

$$\left. \begin{aligned} E &= h\nu = 2\pi\hbar\nu \\ \lambda &= \frac{h}{p} = \frac{2\pi\hbar}{p} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

por lo que (2) quedará

$$\Psi = A e^{-\frac{i}{\hbar}(Et - px)} \quad (4)$$

La ecuación (4) corresponde a la función de onda equivalente al sistema de una partícula libre de masa m energía E , cantidad de movimiento p y libre de restricciones. Pero, si hubiese actuando sobre la partícula un campo de fuerzas conservativo, el sistema tendría energía cinética K y potencial V . De forma que

$$E = K + V = \frac{p^2}{2m} + V \quad (5)$$

Trabajando con la ecuación (4), obtenemos

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} = -\frac{p^2}{\hbar^2} \Psi \quad (6)$$

$$\frac{\partial \Psi}{\partial t} = -\frac{iE}{\hbar} \Psi \quad (7)$$

Multiplicando ambos miembros de (5) por Ψ , se obtiene

$$\Psi E = \frac{p^2}{2m} \Psi + V \Psi \quad (8)$$

despejando de (6) y (7) y reemplazando en (8) llegamos a

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + V \Psi = i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t} \quad (9-1)$$

que es la “**Ecuación de Schrödinger**” unidimensional dependiente del tiempo.

Para el caso tridimensional, quedará

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \left(\frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2} \right) + V \Psi = i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t} \quad (9-2)$$

Si suponemos que la energía potencial V es solo dependiente de la posición ($V(x)$), podremos escribir a la función de onda Ψ como el producto de una función dependiente del tiempo y otra dependiente de la posición. En el caso unidimensional, la (2-2) la podemos escribir como

$$\begin{aligned} \Psi &= A e^{-i\left(\frac{E}{\hbar}\right)t} e^{\left(\frac{ip}{\hbar}\right)x} \\ \Psi &= \psi(x) e^{-i\left(\frac{E}{\hbar}\right)t} \quad (10) \end{aligned}$$

Reemplazando la ecuación (10) en (9-1), obtendremos

$$E \psi(x) e^{-i\left(\frac{E}{\hbar}\right)t} = -\frac{\hbar^2}{2m} e^{-i\left(\frac{E}{\hbar}\right)t} \frac{\partial^2 \psi(x)}{\partial x^2} + V \psi(x) e^{-i\left(\frac{E}{\hbar}\right)t}$$

Ordenando y simplificando, llegamos a que

$$\frac{\partial^2 \psi(x)}{\partial x^2} + \frac{2m}{\hbar^2} (E - V) \psi(x) = 0 \quad (11)$$

que denominamos “**Ecuación de Schrödinger para estado estacionario o independiente del tiempo unidimensional**”. En el caso tridimensional, $\psi(x,y,z)$ y quedará

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} + \frac{2m}{\hbar^2} (E - V) \psi = 0 \quad (12)$$

2- Operadores y valores esperados

2-1 Observable. Definición

En física, un **observable** es toda propiedad del estado de un sistema que puede ser medible ("observada") por alguna secuencia de operaciones físicas. Estas operaciones pueden incluir, por ejemplo, el someter al sistema a diversos campos electromagnéticos y la lectura de valores en un dispositivo. Para todo observable podemos diferenciar una *cualidad* y una *cantidad*, y esta distinción resulta de especial interés en la física cuántica.

- **Observables en física clásica**

En los sistemas gobernados por la mecánica clásica, cualquier valor observable experimentalmente está relacionado por una función matemática de variables reales con el conjunto de estados posibles del sistema. En palabras llanas, podemos obtener, en sistemas muy similares, una variación continua de *cantidad* para cada *cualidad*.

En mecánica clásica, los observables matemáticamente son funciones de las coordenadas de posición y las velocidades (alternativamente los momentos conjugados). Debido a esto un observable en mecánica clásica puede entenderse como una función o aplicación definida sobre el espacio físico del sistema. Gracias a esta noción, puede entenderse la relación entre los observables de la mecánica clásica y la mecánica cuántica. La noción de observable cuántico que a primera vista parece poco intuitiva se aclara notablemente, si pensamos que se corresponden intuitivamente con la acción sobre distribuciones de probabilidad del sistema.

- **Mediciones de diferentes observadores**

En física clásica, pueden definirse diferentes observadores caracterizados por su posición en el espacio y el tipo de coordenadas usadas para referir las magnitudes físicas vectoriales y tensoriales. Debido a su diferente ubicación y orientación cada uno de los diferentes observadores hará medidas diferentes del mismo fenómeno. Sin embargo, la objetividad de la realidad física, conlleva que dichas medidas deben ser relacionables, mediante leyes de transformación bien definidas. En mecánica clásica no-relativista dichas transformaciones de coordenadas que relacionan las medidas de diferentes observadores vienen dadas por el grupo de Galileo, mientras que en mecánica relativista vienen dadas por el grupo de Poincaré (grupo de Lorentz ampliado a las traslaciones).

- **Observables en física cuántica**

En mecánica cuántica, en cambio, la relación entre los estados de un sistema y los valores de un observable es más sutil, y precisa fundamentalmente del álgebra lineal para su explicación.

En la formulación matemática de la mecánica cuántica, los estados son vectores no nulos en un espacio de Hilbert H (en el que se considera que dos vectores especifican el mismo estado si y solo si son múltiplos escalares entre sí). Matemáticamente los observables en mecánica cuántica se representan por operadores lineales autoadjuntos en H . Concretamente, los operadores corresponden a la *cualidad* del observable, mientras que los valores propios, que forman el espectro de cada operador corresponden a los valores posibles de una medición de esa cualidad.

2-2 Operadores y Mecánica cuántica

En mecánica cuántica la representación de magnitudes observables se dará a través de operadores. Un operador es un objeto matemático que actúa sobre una función diciéndonos 'lo que hay que hacer con esa función'. Por ejemplo, el operador gradiente (simbolizado por " ∇ "), aplicado a una función, nos devuelve un vector cuyas componentes son las derivadas parciales de dicha función, o sea, si un vector es el gradiente de alguna función, el operador nos dice que "hay que calcular las derivadas parciales" de la función para representar dicho vector.

Vamos a estudiar ahora los operadores más relevantes en mecánica cuántica y vamos a definir la forma de calcular los valores esperados de las magnitudes observables que ellos representan.

En principio, una propiedad muy importante es que si un operador \hat{A} representa un observable físico A, entonces el valor esperado para A viene dado por la siguiente operación

$$\langle A \rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} \Psi(x) \hat{A} \Psi^*(x) dx$$

2.2.1. Operador posición.

En mecánica cuántica, la posición de una partícula en el espacio (\vec{r}) se representa mediante el operador posición (\hat{r}). Así como el vector posición tiene sus correspondientes componentes ($\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}$), el operador posición también tiene componentes ($\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}$). En problemas unidimensionales, por ejemplo, bastará con utilizar una sola de las componentes de este operador.

El operador posición es uno de los más sencillos operadores, ya que consiste sólo en multiplicar la función por el vector (o la componente) de la posición. Teniendo en cuenta esto, el valor esperado para la posición de una partícula, según la dirección x viene dado por

$$\langle x \rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} x |\Psi(x)|^2 dx = \int_{-\infty}^{+\infty} \Psi(x) x \Psi^*(x) dx$$

2.2.2. Operador cantidad de movimiento.

El operador cantidad de movimiento \hat{p} , magnitud asociada con la cantidad de movimiento \vec{p} de la partícula, tiene la forma

$$\hat{p} = -i \hbar \vec{\nabla}$$

donde $\vec{\nabla}$ es el operador gradiente. Al aplicar el operador cantidad de movimiento a una función, lo que se hace es calcular el gradiente de la función y multiplicarlo por $-i\hbar$. Así como en el caso del operador posición, las componentes del \hat{p} también son operadores. Si se trabaja en coordenadas cartesianas, por ejemplo, las componentes de \hat{p} vienen dadas por

$$\hat{p}_x = \frac{\hbar}{i} \frac{\partial}{\partial x} = -i \hbar \frac{\partial}{\partial x} ; \quad \hat{p}_y = \frac{\hbar}{i} \frac{\partial}{\partial y} = -i \hbar \frac{\partial}{\partial y} \quad y \quad \hat{p}_z = \frac{\hbar}{i} \frac{\partial}{\partial z} = -i \hbar \frac{\partial}{\partial z}$$

Por lo dicho antes, el valor medio o valor esperado para el observable p (para la componente x), viene dado por

$$\langle p_x \rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} \Psi^*(x,t) \left(\frac{\hbar}{i} \frac{\partial}{\partial x} \right) \Psi(x,t) dx$$

2.2.3. Operador hamiltoniano.

En física clásica el hamiltoniano de un sistema cerrado corresponde a la energía total del mismo. Tomando esta misma noción, podemos construir el operador hamiltoniano con ayuda del operador cantidad de movimiento. Sabemos que clásicamente se cumple la relación

$$E_c = \frac{p^2}{2m}$$

Así, se puede definir el operador energía cinética mediante

$$\hat{E}_c = \frac{\hat{p}^2}{2m}$$

Se ve en esta expresión que el operador cantidad de movimiento está elevado al cuadrado. Un operador elevado al cuadrado implica, operativamente, aplicar el operador sobre la función y luego volver a aplicar el mismo operador sobre este resultado, es decir, aplicar el operador dos veces. De este modo, la energía cinética queda expresada por

$$\hat{E}_c = \frac{\hat{p}^2}{2m} = - \frac{\hbar^2}{2m} \vec{\nabla}^2$$

donde $\vec{\nabla}^2 = \nabla^2$ se denomina “operador Laplaciano”, definido como

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}.$$

Entonces, si el hamiltoniano sólo contempla la energía cinética del sistema, entonces

$$\hat{H} = - \left(\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \right).$$

Si además de la energía cinética se considera la energía potencial, el hamiltoniano toma la forma

$$\hat{H} = - \frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V(r)$$

También podemos ver que para problemas unidimensionales se puede definir mediante

$$\hat{H} = - \frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2}{\partial^2 x} + V(x);$$

vemos ahora que la ecuación de Schrödinger dependiente del tiempo, se escribe usando operadores, como

$$i \hbar \frac{\partial \Psi(x,t)}{\partial t} = \hat{H} \Psi(x,t)$$

Y, planteando la ecuación de Schrödinger independiente del tiempo, tendremos

$$\hat{H} \psi = E \psi$$

2.2.4. Operador impulso angular.

Veamos por último el operador impulso angular. Al igual que con los operadores anteriores, la forma de este operador se puede inferir de la definición clásica de la cantidad impulso angular; esto es,

con
$$\vec{L} = \vec{r} \times \vec{p}$$

entonces,
$$\hat{L} = \hat{r} \times \hat{p} = \vec{r} \times [-i\hbar \vec{\nabla}]$$

Si desarrollamos el producto vectorial en coordenadas cartesianas, las componentes del operador serán;

$$\hat{L}_x = -i\hbar \left[y \frac{\partial}{\partial z} - z \frac{\partial}{\partial y} \right]; \quad \hat{L}_y = -i\hbar \left[z \frac{\partial}{\partial x} - x \frac{\partial}{\partial z} \right]; \quad \hat{L}_z = -i\hbar \left[x \frac{\partial}{\partial y} - y \frac{\partial}{\partial x} \right]$$

2.2.5. Operadores en un campo central

Sabemos que el operador cantidad de movimiento se define en tres dimensiones por

$$\hat{p} = -i\hbar \vec{\nabla} = -i\hbar \left[\frac{\partial}{\partial x} \hat{i} + \frac{\partial}{\partial y} \hat{j} + \frac{\partial}{\partial z} \hat{k} \right].$$

Por otro lado, asociado al anterior está el Hamiltoniano, que definimos en cartesianas como

$$\hat{H} = -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V(\vec{r}),$$

Si trabajamos en coordenadas esféricas, considerando un campo radial, tenemos que el hamiltoniano adoptará la forma

$$\hat{H} = -\frac{\hbar^2}{2m} \left[\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2} \right] + V(\vec{r})$$

Por otro lado, los operadores momento angular y cuadrado del momento angular, podrán escribirse en coordenadas esféricas como

$$\begin{aligned}
L_x &= -i\hbar \left[-\sin\varphi \frac{\partial}{\partial\theta} - \cos\varphi \cot\theta \frac{\partial}{\partial\varphi} \right] \\
L_y &= -i\hbar \left[\cos\varphi \frac{\partial}{\partial\theta} - \sin\varphi \cot\theta \frac{\partial}{\partial\varphi} \right] \\
L_z &= -i\hbar \left[\frac{\partial}{\partial\varphi} \right] \\
\hat{L}^2 &= -\frac{\hbar^2}{2m} \left[\frac{1}{\sin\theta} \frac{\partial}{\partial\theta} \left(\sin\theta \frac{\partial}{\partial\theta} \right) + \frac{1}{\sin^2\theta} \frac{\partial^2}{\partial\varphi^2} \right]
\end{aligned}$$

Observando la última expresión y la del hamiltoniano, podremos escribir a este último como

$$\hat{H} = -\frac{\hbar^2}{2m} \left[\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial}{\partial r} \right) \right] + \frac{1}{r^2} \hat{L}^2 + V(\vec{r})$$

3- La hermiticidad de los operadores

Hemos dicho que las funciones de onda que satisfacen la ecuación de Schrödinger son complejas. También se vio la forma de obtener el valor esperado de las magnitudes que representan los operadores, lo cual consiste en trabajar sobre esa función de onda compleja. Podemos plantearnos si es posible obtener valores esperados que sean complejos, pero ¿tendría esto algún significado físico? Es lógico pensar que los valores esperados de los observables deben ser reales, porque en definitiva los observables son magnitudes medibles.

Para que esto suceda, el operador asociado a cualquier magnitud física debe ser *hermítico*. La característica esencial de un operador hermítico (o en álgebra, las matrices hermíticas) es que el autoadjunto de dicho operador es el mismo operador. Formalmente, para que un operador sea hermítico debe cumplir

$$\int_a^b \Psi_2^* \hat{A} \Psi_1 dx = \left[\int_a^b \Psi_1 \hat{A} \Psi_2 dx \right]^* = \int_a^b \Psi_1 (\hat{A} \Psi_2)^* dx$$

Para comprobar que se cumple esta relación podemos hacer $\Psi_1 = \Psi_2 = \Psi$ con lo que se obtiene

$$\langle A \rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} \Psi^*(x,t) \hat{A} \Psi(x,t) dx = \left[\int_{-\infty}^{+\infty} \Psi^*(x,t) \hat{A} \Psi(x,t) dx \right]^* = \langle A \rangle^*$$

Al ser $\langle A \rangle = \langle A \rangle^*$ se corrobora que $\langle A \rangle$ es real.

4- Autovalores y autofunciones de operadores

En el planteo de la ecuación de Schrödinger independiente del tiempo vimos que esta ecuación se puede escribir como

$$H\Psi = E\Psi,$$

Esta ecuación algebraica puede interpretarse de la siguiente manera: si se cumple que, al aplicar el operador H a una función Ψ , el resultado es esa misma función multiplicado por un número, en este caso la energía E , entonces decimos que la función Ψ es una función propia (también autofunción o función característica) del sistema, mientras que el valor de E es un valor propio (también autovalor o valor característico) del sistema.

En general, lo que se obtiene al resolver la ecuación no es una única función, sino un conjunto de funciones Ψ_n que satisfacen la ecuación para los correspondientes autovalores E_n , y ya que el operador hamiltoniano nos habla de la energía del sistema, entonces los autovalores E_n corresponden a los posibles valores de energía en los que se podrá encontrar al sistema. Esto significa que al efectuar una medición, el resultado será alguno de los autovalores de energía E_n . Lo anterior se puede generalizar para cualquier operador: si se satisface la ecuación

$$\hat{A} \Psi_n(x) = \lambda_n \Psi_n(x)$$

Entonces al efectuar una medida precisa del observable asociado al operador \hat{A} , el resultado será alguno de los posibles valores λ_n , donde Ψ_n es la función propia correspondiente al estado n .

Otra propiedad importante de las autofunciones es que ellas constituyen un conjunto de soluciones a la ecuación de autovalores, cada una de las cuales tendrá una amplitud dada. Si se indica por c_n a dicha amplitud, el conjunto de soluciones puede ser escrito como

$$\Psi(x) = \sum_n c_n \Psi_n(x)$$

Los coeficientes c_n están relacionados con la probabilidad de obtener los correspondientes valores propios de la función. Una forma de plantear esta relación es indicando la probabilidad efectiva de que el resultado de una medición precisa arroje como resultado un autovalor dado. En nuestro caso,

$$P(E_n) = |c_n|^2$$

Con lo cual, el valor esperado de la energía del sistema viene dado por

$$\langle E \rangle = \sum_n E_n |c_n|^2$$

4.1. Estados degenerados.

Existen situaciones en las que para un mismo autovalor se tienen distintas autofunciones que satisfacen la ecuación de Schrödinger. En este caso, se dice que los estados son degenerados. Un ejemplo de esta situación, que analizaremos más adelante, se da en el átomo de hidrógeno. Veremos que para una misma energía se pueden encontrar diferentes autoestados del sistema, caracterizados por los números cuánticos. Estos autoestados surgen naturalmente, al resolver la ecuación de Schrödinger para el sistema.

Si por ejemplo, \hat{A} es un operador degenerado y λ_n uno de sus autovalores, la ecuación de autovalores puede escribirse

$$\hat{A} \Psi_{n,m}(x) = \lambda_n \Psi_{n,m}(x)$$

donde el subíndice m hace referencia a los estados degenerados del sistema.

Efecto Zeeman.

Un ejemplo en el que se observa este tipo de degeneración es el fenómeno conocido como efecto Zeeman. Este efecto, observado tiempo antes de que se formalizara la mecánica cuántica, consiste en el desdoblamiento de ciertas líneas espectrales (en tripletes o multipletes), en presencia de

campos magnéticos intensos. Dicho de otro modo, la luz emitida por las desexcitaciones de los átomos en una descarga gaseosa se modifica en presencia de un campo magnético. La mecánica cuántica explica este hecho, admitiendo que en el átomo existen estados energéticos degenerados, esto es, diferentes funciones de onda que son soluciones de la ecuación de Schrödinger para los mismos valores de energía. Esta degeneración desaparece cuando el gas se encuentra en un campo magnético, evidenciando una pequeña diferencia de energía entre ellos, asociada a la magnitud del campo magnético externo.

4.2. La desviación del valor medio

Es sencillo verificar que si efectivamente el observable f es un autovalor correspondiente al autoestado Ψ_f del operador \hat{F} , al medir la variable F para el sistema en el estado Ψ_f , se tendrá con certeza el valor f . En efecto, ya que

$$\hat{F} \Psi_f = f \Psi_f,$$

el valor esperado para la variable F es

$$\langle F \rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} \Psi_f^* \hat{F} \Psi_f dx = \int_{-\infty}^{+\infty} \Psi_f^* f \Psi_f dx = f$$

Luego, la desviación en F es

$$\langle \Delta F \rangle^2 = \langle F^2 \rangle - \langle F \rangle^2$$

donde para la precisión se tiene $\langle \Delta F \rangle^2 = 0$

De las relaciones anteriores surge que $\langle F^2 \rangle = f^2$. Veamos ahora quién es $\langle F^2 \rangle$.

$$\langle \hat{F}^2 \rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} \Psi_f^* \hat{F}^2 \Psi_f dx = \int_{-\infty}^{+\infty} \Psi_f^* \hat{F} \hat{F} \Psi_f dx = \int_{-\infty}^{+\infty} \Psi_f^* \hat{F} f \Psi_f dx = f \int_{-\infty}^{+\infty} \Psi_f^* \hat{F} \Psi_f dx = f^2$$

Se ve entonces que $\langle F^2 \rangle = \langle F \rangle^2 = f^2$, con lo cual se obtiene $\langle \Delta F \rangle^2 = 0$

5- Relaciones de conmutación

Vamos ahora a definir una relación entre operadores, que nos permitirá obtener muchas propiedades de los observables físicos asociados a estos operadores, la *relación de conmutación*. Se define el *conmutador de los operadores* \hat{A} y \hat{B} como:

$$[\hat{A}, \hat{B}] = \hat{A} \cdot \hat{B} - \hat{B} \cdot \hat{A}$$

El conmutador de dos operadores es un nuevo operador. Al aplicar este nuevo operador a una función Ψ se tiene:

$$[\hat{A}, \hat{B}] \Psi = \hat{A} \cdot (\hat{B} \Psi) - \hat{B} \cdot (\hat{A} \Psi)$$

Sean A, B, C tres operadores. Se puede corroborar que aplicados a una dada función $f(x, y, z)$, se cumplen las siguientes propiedades:

$$[A, (B + C)] = [A, B] + [A, C]$$

$$[A, B \cdot C] = [A, B] \cdot C + B \cdot [A, C]$$

$$[A \cdot B, C] = A \cdot [B, C] + [A, C] \cdot B$$

$$[A, B] = - [B, A]$$

Si para los operadores \hat{A} y \hat{B} se verifica que el conmutador $[\hat{A}, \hat{B}]$ aplicado a una función dada es nulo, entonces se dice que los operadores conmutan. A continuación analizaremos dos aspectos importantes de las relaciones de conmutación.

5.1. Evolución temporal del valor medio

Supongamos una variable F independiente del tiempo, representada por el operador \hat{F} . Para saber si $\langle F \rangle$ cambia a lo largo del tiempo se puede calcular su derivada temporal, esto es

$$\frac{\partial}{\partial t} \langle F \rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} \left(\frac{\partial}{\partial t} \Psi^* \hat{F} \Psi + \Psi^* \hat{F} \frac{\partial}{\partial t} \Psi \right) dx$$

Ahora bien, por la ecuación de Schrödinger vemos que

$$\hat{H} \Psi = i \hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t} \quad \text{y} \quad \hat{H} \Psi^* = -i \hbar \frac{\partial \Psi^*}{\partial t}$$

de modo que la integral se convierte en

$$\frac{\partial}{\partial t} \langle F \rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} \left((i/\hbar) \Psi^* [\hat{H}\hat{F} - \hat{F}\hat{H}] \Psi \right) dx$$

Si los operadores H y F conmutan la integral es nula, con lo cual se conserva $\langle F \rangle$.

6-Mediciones simultáneas y relaciones de incertidumbre

Las operaciones de conmutación están íntimamente relacionadas con la posibilidad (o imposibilidad, según sea el caso) de medir simultáneamente dos magnitudes. Supongamos un operador \hat{A} que cumpla con la ecuación de autovalores

$$\hat{A} \Psi_{ab} = a \Psi_{ab},$$

y otro operador \hat{B} para el cual proponemos que las autofunciones Ψ_{ab} verifican

$$\hat{B} \Psi_{ab} = b \Psi_{ab}.$$

Si aplicamos el operador \hat{A} a $\hat{B} \Psi_{ab}$, obtenemos

$$\hat{A}(\hat{B} \Psi_{ab}) = ab \Psi_{ab} = \hat{B} a \Psi_{ab} = \hat{B}(\hat{A} \Psi_{ab})$$

$$\Rightarrow (\hat{A}\hat{B} - \hat{B}\hat{A}) \Psi_{ab} = 0$$

La relación anterior implica que $(\hat{A}\hat{B} - \hat{B}\hat{A}) = 0$, o lo que es lo mismo,

$$[\hat{A}, \hat{B}] = 0.$$

La conclusión de lo anterior es que *si dos operadores conmutan entonces, al compartir ψ , las magnitudes que representan pueden ser medidas de forma simultánea*. Esto significa que no hay limitaciones teóricas para la medición simultánea de las cantidades que representan.

Veremos ahora que *para los operadores que no conmutan, la medición simultánea de las magnitudes no se puede llevar a cabo con la precisión deseada*. ¿Medición simultánea entre magnitudes? ¿Precisión deseada? Es evidente que existe una relación entre estas ideas y el principio de indeterminación de Heisenberg.

Para operadores A y B que no conmutan, se puede demostrar que la medición simultánea de los observables asociados a dichos operadores guardan la relación de incertidumbre

$$\Delta A \Delta B \geq - (i/2)[A, B].$$

Esta relación no es otra que la relación de incerteza de Heisenberg. Mediante el cálculo de conmutadores podemos tener cuál es la incerteza asociada a la medición simultánea de las magnitudes en juego. Así, para saber efectivamente qué observables se pueden determinar simultáneamente y cuáles no, se efectúa el cálculo del conmutador.

Para mostrar en forma explícita la manera en la que se trabajan estas relaciones se desarrollan a continuación dos ejemplos de conmutadores. Se verá que los operadores de cantidad de movimiento y de posición para la misma dirección (como ser x) no conmutan, lo cual fue anticipado en el desarrollo preliminar del principio de incertidumbre.

6.1. Conmutador de x y p_x

Para ver la relación de incerteza plasmada en un ejemplo concreto (y ya conocido) vamos a calcular el conmutador entre la componente x del operador posición y la componente x del operador cantidad

de movimiento lineal, $p_x = -i\hbar \frac{\partial}{\partial x}$.

Para hacerlo, apliquemos este operador a una función $f(x, y, z)$ derivable. Recordemos, que por definición, el conmutador entre dos operadores A y B cumple la relación

$$[A, B]f = A(Bf) - B(Af)$$

de modo que para nuestro problema podemos plantear

$$[x, -i\hbar \frac{\partial}{\partial x}]f = x \cdot \left(-i\hbar \frac{\partial f}{\partial x} \right) - \left(-i\hbar \frac{\partial x f}{\partial x} \right)$$

En el segundo término, tenemos la componente x del operador momento aplicado a una función (recordarlo) genérica y a la componente x de la posición, por lo que tendremos que operar como la derivada de un producto, quedando

$$[x, -i\hbar \frac{\partial}{\partial x}]f = \left(-i\hbar x \frac{\partial f}{\partial x} \right) + \left(i\hbar f \frac{\partial x}{\partial x} \right) + \left(i\hbar x \frac{\partial f}{\partial x} \right)$$

quedando entonces

$$[x, -i\hbar \frac{\partial}{\partial x}]f = i\hbar f.$$

Vemos que el conmutador no es nulo, sino que su valor es

$$[x, p_x] = i\hbar,$$

y al ser la operación distinta de cero, decimos que los operadores *no son conmutables*.

6.2 Conmutador de x y p_y

Veamos ahora lo que sucede con el conmutador de los operadores x y p_y . Ya que estos operadores son componentes de la posición y del ímpetu lineal de diferentes direcciones, es de esperar que no exista relación de incertidumbre, ya que no son operadores conjugados. Para ver si esto es cierto, teniendo en cuenta que $p_y = -i\hbar \frac{\partial}{\partial y}$.

$$[x, -i\hbar \frac{\partial}{\partial y}]f = x \cdot \left(-i\hbar \frac{\partial f}{\partial y} \right) - \left(-i\hbar \frac{\partial (xf)}{\partial y} \right)$$

Derivando el segundo término del lado derecho, obtenemos

$$[x, -i\hbar \frac{\partial}{\partial y}]f = -i\hbar x \frac{\partial f}{\partial y} - \left(-i\hbar f \frac{\partial x}{\partial y} - i\hbar x \frac{\partial f}{\partial y} \right)$$

Como x no depende de y , se tiene que $\frac{\partial x}{\partial y} = 0$, quedando

$$[x, -i\hbar \frac{\partial}{\partial y}]f = x \cdot \left(-i\hbar \frac{\partial f}{\partial y} \right) - \left(-i\hbar x \frac{\partial f}{\partial y} \right) = 0$$

Se ve entonces que el conmutador es nulo, lo cual implica que no existen restricciones teóricas respecto de la medición simultánea de los observables asociados a x y a p_y .

6.3. Principio de incerteza.

A continuación, le daremos a la incertidumbre dentro de la Mecánica Ondulatoria un significado matemático exacto recurriendo para ello a la estadística. Definiremos al cuadrado de la incertidumbre de cierta cantidad en particular como la desviación media cuadrática con respecto a la media aritmética. La desviación con respecto a la media aritmética está dada por:

$$\Delta x = x - \langle x \rangle$$

La variable en este caso que representa a la posición medida sobre la coordenada- x es una variable continua.

Habiendo formulado la definición anterior, el valor de la esperanza matemática del cuadrado de la desviación, o desviación media cuadrática, estará dada operacionalmente por la siguiente expresión:

$$\begin{aligned} \langle \Delta x^2 \rangle &= \int \psi^* (\Delta x)^2 \psi dx = \int \psi^* (\Delta x) (\Delta x) \psi dx \\ &= \int (\Delta x \psi^*) (\Delta x \psi) dx = \int |\Delta x \psi|^2 dx \end{aligned}$$

Obsérvese que esta definición se ha considerado a Δx como un operador Hermitiano.

De modo semejante, podemos definir también a la incertidumbre en el momentum como la desviación media cuadrática con respecto a la media aritmética del momentum:

$$\langle \Delta p_x^2 \rangle = \int |\Delta p_x \psi|^2 dx$$

El producto Π de ambas cantidades que es en lo que estamos realmente interesados será simplemente:

$$\Pi = \langle \Delta x^2 \rangle \langle \Delta p_x^2 \rangle$$

Recurriremos ahora a la bien conocida desigualdad de Schwarz aplicada a funciones de variables continuas:

$$\int |f|^2 dx \cdot \int |g|^2 dx \geq \left| \int f^* g dx \right|^2$$

en donde f^* es el conjugado complejo de la función f .

Al aplicar la desigualdad de Schwartz al producto Π de las dos incertidumbres haciendo:

$$f = \Delta x \psi \quad g = \Delta p_x \psi$$

tenemos entonces:

$$\langle \Delta x^2 \rangle \langle \Delta p_x^2 \rangle \geq \left| \int \psi^* \Delta x \Delta p_x \psi dx \right|^2$$

\Downarrow
 $|\langle \Delta x \Delta p_x \rangle|^2$

El operador $\Delta x \Delta p_x$ que aparece en la desigualdad bajo el signo de la integral puede ser escrito de otra manera más conveniente para nuestros propósitos:

$$\begin{aligned} \Delta x \Delta p_x &= \frac{1}{2}(2\Delta x \Delta p_x) + \frac{1}{2}\Delta p_x \Delta x - \frac{1}{2}\Delta p_x \Delta x \\ &= \frac{1}{2}(\Delta x \Delta p_x - \Delta p_x \Delta x + \Delta x \Delta p_x + \Delta p_x \Delta x) \\ &= \frac{1}{2}[\Delta x, \Delta p_x] + \frac{1}{2}(\Delta x \Delta p_x + \Delta p_x \Delta x) \\ &= \frac{1}{2}(i\hbar) + \frac{1}{2}(\Delta x \Delta p_x + \Delta p_x \Delta x) \end{aligned}$$

Tenemos ahora una expresión que consta de dos términos, un término imaginario y un término real:

$$\Delta x \Delta P_x = \left\{ \begin{array}{c} \text{término} \\ \text{imaginario} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{c} \text{término} \\ \text{real} \end{array} \right\}$$

Puesto que:

$$\left| \left\langle \frac{i\hbar}{2} \right\rangle \right|^2 = \left| \frac{i\hbar}{2} \right|^2 = \left(-\frac{i\hbar}{2} \right) \left(+\frac{i\hbar}{2} \right) = \frac{\hbar^2}{4}$$

podemos afirmar entonces que la desigualdad puede ser escrita de la manera siguiente:

$$|\langle \Delta x \rangle \langle \Delta p_x \rangle|^2 = \frac{\hbar^2}{4} + \frac{1}{4} \langle \Delta x \Delta p_x + \Delta p_x \Delta x \rangle^2$$

El segundo término $\Delta x \Delta p_x + \Delta p_x \Delta x$ en esta expresión es obviamente un operador hermitiano, y más aún se trata de un operador hermitiano con valores propios reales, teniendo por lo tanto una esperanza matemática que debe ser real y además positiva. Puesto que el menor valor posible que esta esperanza matemática pueda tomar es cero, entonces de la desigualdad de Schwartz aplicada a este problema, obtenemos la siguiente relación:

$$\langle \Delta x^2 \rangle \langle \Delta p_x^2 \rangle \geq \frac{\hbar^2}{4}$$

Esta última expresión nos dice que el producto de la desviación media cuadrática en la coordenada-x y la desviación media cuadrática en el momentum debe ser igual o mayor que $(\hbar/2)^2$. Este es precisamente el enunciado del principio de incertidumbre de Heisenberg, sin haber tenido que recurrir para la derivación del mismo a matriz alguna.

APÉNDICE 3

Diagramas de Feynman






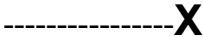
https://es.wikipedia.org/wiki/Diagrama_de_Feynman

Los **diagramas de Feynman** en física son gráficos que representan las trayectorias de las partículas en las fases intermedias de un proceso de colisión, para resolver de manera eficaz los cálculos implicados en dicho proceso, procedentes de la teoría cuántica de campos. Su autor es el físico estadounidense Richard Feynman que los introdujo por vez primera en 1948, publicándose su caracterización en un famoso artículo de 1949.² También son utilizados en otras teorías para resolver problemas de muchos cuerpos como en la física del estado sólido.

a-Construcción

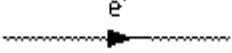
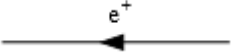


Los diagramas de Feynman se componen de agrupaciones de símbolos básicos, representando ciertos tipos de partículas elementales. Los fermiones (partículas materiales) están de acuerdo con la convención habitual de representarse mediante líneas continuas con flecha, que indica con su sentido si se trata de una partícula (en la dirección de tiempo) o una antipartícula (en contra de la dirección del tiempo). Casualmente, a menudo se presentan antipartículas, cuyo movimiento no tiene el significado físico que les atribuye el diagrama. Para las letras de las líneas de partículas y antipartículas, hay varias convenciones. En la mayoría de los casos se escribe el símbolo exacto de la partícula. Sin embargo, algunos autores utilizan una notación más corta y más general, que puede referirse tanto a la partícula como a la antipartícula (por ejemplo e , en lugar de $e^{(+)}$ o de $e^{(-)}$), ya que la información, si se trata de una partícula o una antipartícula, ya va indicada en la dirección de la flecha. La dirección del eje de tiempo unas veces se elige de abajo hacia arriba y otras veces de izquierda a derecha.

Los bosones, elementos que median en la interacción entre partículas, por lo general son representados mediante líneas onduladas o espirales, dependiendo de la interacción representada. Las partículas escalares se representan típicamente con líneas discontinuas. Hay algunas excepciones a estas reglas generales, por ejemplo, los bosones W puede ser simbolizados como líneas discontinuas.


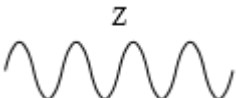
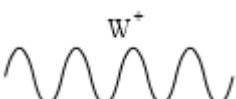
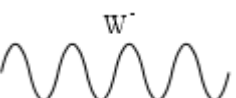
Símbolo	Significado
	Fermión
	Antifermión
	Bosones gauge en la interacción débil
	Gluón g en la interacción fuerte
	Bosón de Higgs (o en general bosones escalares, raro para bosones vectoriales)
	Terminador

Además, las etiquetas se utilizan para definir a qué partícula elemental se hace referencia:

Leptones

Símbolo	Significado
	electrón
	positrón
	muon
	neutrino

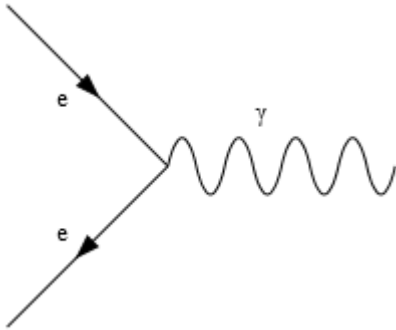
Bosones

Símbolo	Significado
	Fotón
	Bosón Z
	Bosón W ⁽⁺⁾
	Bosón W ⁽⁻⁾

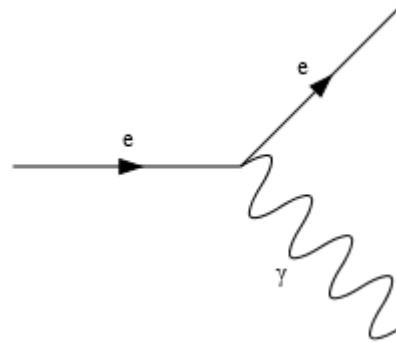
Los diagramas de Feynman tienen líneas externas que convergen en puntos de interacción. Las líneas internas conectan pares de puntos de interacción. Las líneas externas corresponden a partículas entrantes y salientes. Los puntos de interacción donde las líneas se encuentran también se llaman vértices. En los vértices se pueden crear, destruir o dispersar partículas.

Siempre con el tiempo representado de izquierda a derecha, la rotación alrededor de un vértice lleva a diferentes interpretaciones:

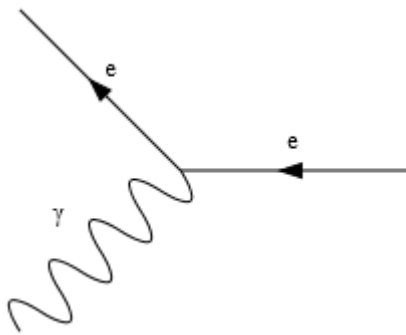
Procesos de Confluencia y Divergencia



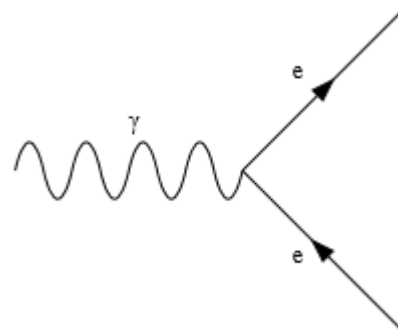
Fusión entre electrón y positrón liberando un fotón



Emisión de un fotón por un electrón



Absorción de un fotón por un positrón



Descomposición de un fotón en un electrón y un positrón

Debe señalarse que un diagrama de Feynman se compone exclusivamente de partículas conectadas mediante vértices contiguos.

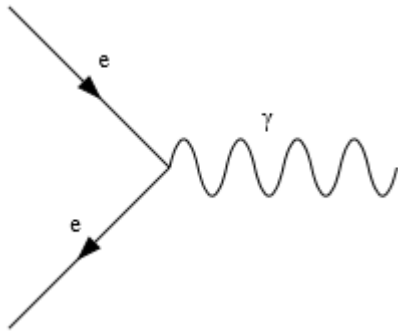
b- Reglas de Feynman

Las reglas de Feynman describen qué interacciones son posibles y cuáles no lo son.

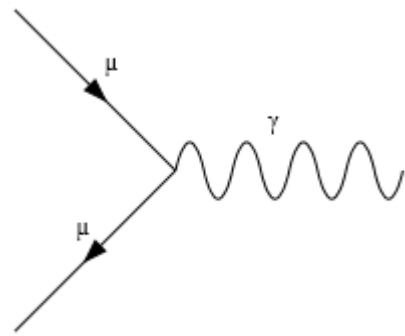
-Fotones

Los fotones interactúan con todas las partículas elementales cargadas eléctricamente.

Representación para electrones y muones:



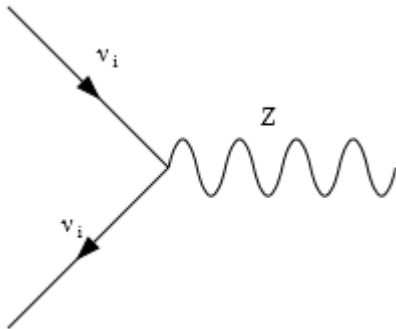
Interacción entre electrones, positrones y fotones



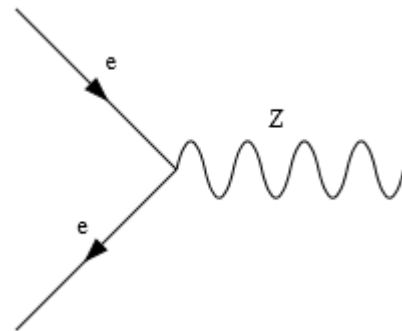
Interacción entre muones y fotones

-Bosones Z

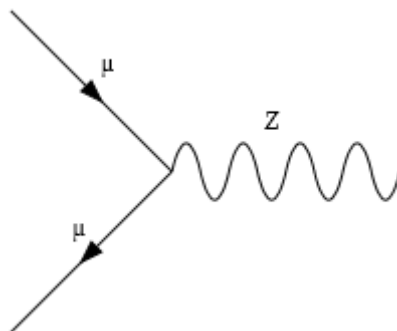
El bosón Z interactúa entre todas las demás partículas elementales del modelo estándar con la excepción de los gluones; simultáneamente, los fotones sólo interactúan con los bosones W. En particular, los neutrinos (ν_1 , ν_2 y ν_3) no tienen ninguna interacción con los fotones. Por lo tanto, en este caso se deberá dar la generación y detección de bosones Z y de bosones W



Interacción entre bosón Z y neutrinos



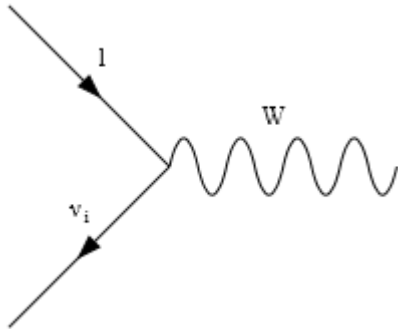
Interacción entre electrones, positrones y bosón Z



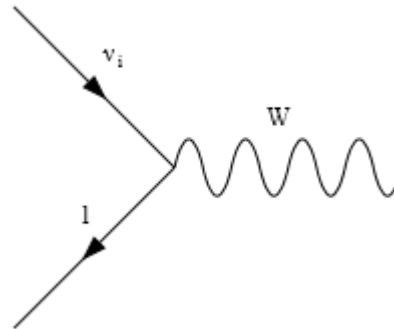
Interacción entre muones, anti-muones y bosón Z

- Bosones W

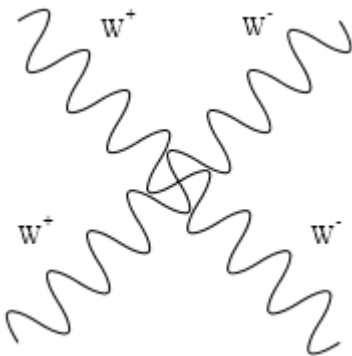
El bosón W media entre neutrinos por un lado y leptones con carga (electrones, muones y tauones) por otro. Entre quarks del tipo *up* y *down*, el bosón W es el portador de la carga eléctrica positiva (W^+) o negativa (W^-). Debido a la carga eléctrica, la interacción del bosón W está sujeta a la presencia del fotón. Además, interactúa con el bosón Z y con otros bosones W.



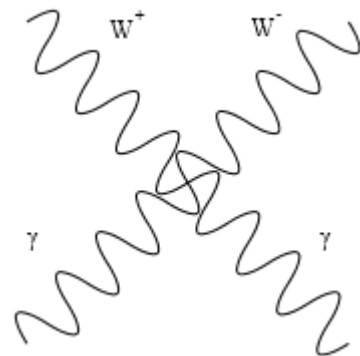
Interacción entre leptones de carga negativa, neutrinos y bosón W



Interacción entre los neutrinos, leptones con carga positiva y el bosón W



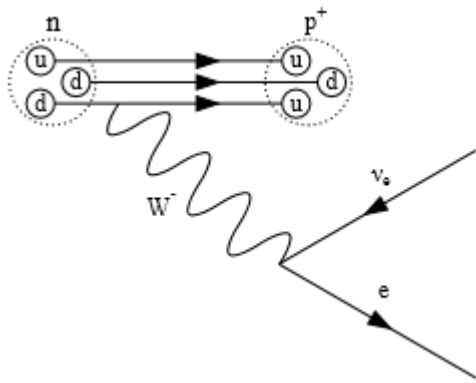
Interacción entre los dos bosones W con carga diferente



Interacción entre los dos bosones W con carga diferente y dos fotones

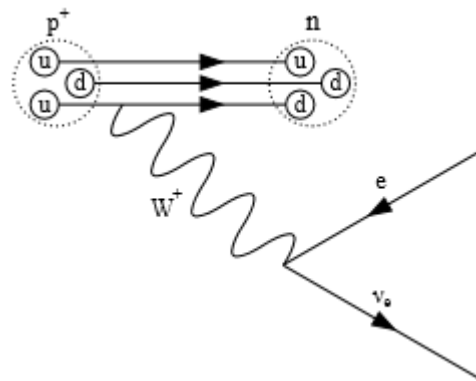
(en ambos la línea de tiempo corre de arriba a abajo)

Los bosones W son especialmente interesantes porque tienen permitido el cambio de "sabor". Esto significa que el número de electrones, neutrinos, etc. puede cambiar. Esta característica juega un papel importante acerca de la desintegración beta



β^- -desintegración de un neutrón

$$n \rightarrow p + e^{(-)} + \bar{\nu}_e$$



β^+ -desintegración de un protón

$$p \rightarrow n + e^{(+)} + \nu_e$$

APÉNDICE 4

Acelerador de partículas

https://es.wikipedia.org/wiki/Acelerador_de_part%C3%ADculas

Un **acelerador de partículas** es un dispositivo que utiliza campos eléctricos para acelerar partículas cargadas hasta altas velocidades, y así, colisionarlas con otras partículas. De esta manera, se generan multitud de nuevas partículas que -generalmente- son muy inestables y duran menos de un segundo. Esto permite estudiar más a fondo las partículas que fueron colisionadas por medio de las que fueron generadas. Hay dos tipos básicos de aceleradores de partículas: los lineales y los circulares. El tubo de rayos catódicos de un televisor es una forma simple de acelerador de partículas.

Los aceleradores de partículas reproducen, en cierta forma, la acción de los rayos cósmicos sobre la atmósfera terrestre, lo cual produce al azar una lluvia de partículas exóticas e inestables. Sin embargo, los aceleradores prestan un entorno mucho más controlado para estudiar las propiedades de estas partículas generadas y su proceso de desintegración.

Al trabajar con energías provenientes de campo eléctricos se utiliza como unidad el “electronvoltio”, al que se simboliza e V, que representa la variación de energía potencial eléctrica de un electrón, al moverse en una región donde se generó una diferencia de potencial de 1 voltio y, sabiendo que $\Delta E = q \Delta V$ se obtiene que $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ joules}$.

En física de altas energías, el electronvoltio resulta una unidad muy pequeña, por lo que son de uso frecuente múltiplos como el megaelectronvoltio MeV o el gigaelectronvoltio GeV. En la actualidad, con los más potentes aceleradores de partículas, se han alcanzado energías del orden del teraelectronvoltio TeV (Un ejemplo es el gran colisionador de hadrones, LHC, que está preparado para operar con una energía de hasta 13 teraelectronvoltios). Hay objetos en nuestro universo que son acelerados con energías aún mayores: se han detectado rayos gama de decenas de TeV y rayos cósmicos de pentaelectronvoltios (PeV, mil TeV), y hasta de decenas de exaelectronovoltios (EeV, equivalente a mil PeV).

$$1 \text{ keV} = 10^3 \text{ eV}$$

$$1 \text{ MeV} = 10^3 \text{ keV} = 10^6 \text{ eV}$$

$$1 \text{ GeV} = 10^3 \text{ MeV} = 10^9 \text{ eV}$$

$$1 \text{ TeV} = 10^3 \text{ GeV} = 10^{12} \text{ eV}$$

$$1 \text{ PeV} = 10^3 \text{ TeV} = 10^{15} \text{ eV}$$

$$1 \text{ EeV} = 10^3 \text{ PeV} = 10^{18} \text{ eV}$$

a- Aceleradores de altas energías

Aceleradores lineales

Los aceleradores lineales (muchas veces se usa el acrónimo en inglés *linac*) de altas energías utilizan un conjunto de placas o tubos situados en línea, a los que se les aplica un campo eléctrico alterno. Cuando las partículas se aproximan a una placa, se aceleran hacia ella al aplicar una polaridad opuesta a la suya. Justo cuando la traspasan, a través de un agujero practicado en la placa, la polaridad se invierte, de forma que en ese momento la placa repele la partícula, acelerándola por tanto hacia la siguiente placa. No se acelera una sola partícula, sino un continuo de

haces de partículas, de forma que se aplica a cada placa un potencial alterno cuidadosamente controlado de forma que se repita de manera continua el proceso aceleración de cada haz.

A medida que las partículas se acercan a la velocidad de la luz, la velocidad de inversión de los campos eléctricos se hace tan alta que deben operar a frecuencias de microondas y por eso, en muy altas energías, se utilizan cavidades resonantes de frecuencias de radio en lugar de placas.

Los tipos de aceleradores de corriente continua capaces de acelerar a las partículas hasta velocidades suficientemente altas como para causar reacciones nucleares son los generadores Cockcroft-Walton o los multiplicadores de potencial, que convierten una corriente alterna a continua de alto voltaje, o bien generadores Van de Graaf que utilizan electricidad estática transportada mediante cintas.

Estos aceleradores se usan en muchas ocasiones como primera etapa antes de introducir las partículas en los aceleradores circulares. El acelerador lineal más largo del mundo es el colisionador electrón-positrón Stanford Linear Accelerator (SLAC), de 3 km de longitud.

Aceleradores debidamente diseñados son los que se usan en radioterapia y radiocirugía. Utilizan válvulas klistrón y una determinada configuración de campos magnéticos, produciendo haces de electrones de una energía de 6 a 30 millones de electronvoltios (MeV). En ciertas técnicas se utilizan directamente esos electrones, mientras que en otras se les hace colisionar contra un blanco de número atómico alto para producir haces de rayos X. La seguridad y fiabilidad de estos aparatos está haciendo retroceder a las antiguas unidades de cobaltoterapia.

Una aplicación tecnológica de importancia en las que se usan este tipo de aceleradores es la Espalación para la generación de neutrones aplicables a los amplificadores de potencia para la transmutación de los isótopos radiactivos más peligrosos generados en la fisión.

Aceleradores circulares

Estos tipos de aceleradores poseen una ventaja añadida a los aceleradores lineales al usar campos magnéticos en combinación con los eléctricos para modificar las trayectorias, pudiendo conseguir aceleraciones mayores en espacios más reducidos. Además las partículas pueden permanecer confinadas en determinadas configuraciones teóricamente de forma indefinida.

Sin embargo poseen un límite a la energía que puede alcanzarse debido a la radiación sincrotrón que emiten las partículas cargadas al ser aceleradas. La emisión de esta radiación supone una pérdida de energía, que es mayor cuanto más grande es la aceleración impartida dependiendo de la masa de la partícula. Al obligar a la partícula a describir una trayectoria circular realmente lo que se hace es acelerar la partícula, ya que la velocidad cambia su dirección, y de este modo es inevitable que pierda energía hasta igualar la que se le suministra, alcanzando una velocidad máxima.

Algunos aceleradores poseen instalaciones especiales que aprovechan esa radiación, a veces llamada luz sincrotrón. Esta radiación se utiliza como fuentes de Rayos X de alta energía, principalmente en estudios de materiales o de proteínas por espectroscopia de rayos X o por absorción de rayos X por la estructura fina (o espectrometría XAS).

Esta radiación es mayor cuando las partículas son más livianas, por lo que se utilizan ese tipo de partículas partícula (principalmente electrones) cuando se pretenden generar grandes cantidades de esta radiación, pero generalmente se aceleran partículas pesadas, protones o núcleos ionizados más pesados, que hacen que estos aceleradores puedan alcanzar mayores energías. Este es el caso del gran acelerador circular del CERN donde el LEP, colisionador de electrones y positrones, se ha sustituido por el LHC, colisionador de hadrones.

Los aceleradores de partículas más grandes y potentes, como el RHIC, el LHC o el Tevatrón se utilizan en experimentos de física de partículas.

Ciclotrón

El primer ciclotrón fue desarrollado por Ernest Orlando Lawrence en 1929 en la Universidad de California. En ellos las partículas se inyectan en el centro de dos pares de imanes en forma de "D". Cada par forma un dipolo magnético y además se les carga de forma que exista una diferencia de potencial alterna entre cada par de imanes. Esta combinación provoca la aceleración.

Estos aceleradores tienen un límite de velocidad bajo en comparación con los sincrotrones debido a los efectos. Aun así las velocidades que se alcanzan son bastante altas, llamadas relativistas por ser cercanas a la velocidad de la luz. Por este motivo se suelen utilizar unidades de energía (electrónvoltios y sus submúltiplos habitualmente) en lugar de unidades de velocidad. Por ejemplo, para protones, el límite se encuentra en unos 10 MeV. Por este motivo los ciclotrones solo se pueden usar en aplicaciones de *bajas energías*. Existen algunas mejoras técnicas como el sincrociclotrón o el ciclotrón síncrono, pero el problema no desaparece. Algunas máquinas utilizan varias fases acopladas para utilizar mayores frecuencias (por ejemplo el rodotrón).

Estos aceleradores se utilizan por ejemplo para la producción de radioisótopos de uso médico (como por ejemplo la producción de ^{18}F para su uso en los PET), para la esterilización de instrumental médico o de algunos alimentos, para algunos tratamientos oncológicos y en la investigación. También se usan para análisis químicos, formando parte de los llamados espectrómetros de masas. Para alcanzar energías superiores, del orden de los GeV y superiores, es necesario utilizar sincrotrones.

Sincrotrón

Uno de los primeros sincrotrones, que aceleraba protones, fue el Bevatron construido en el LaboraTorio nacional Brookhaven (Nueva York), que comenzó a operar en 1952, alcanzando una energía de 3 GeV.

El sincrotrón presenta algunas ventajas con respecto a los aceleradores lineales y los ciclotrones. Principalmente que son capaces de conseguir mayores energías en las partículas aceleradas. Sin embargo necesitan configuraciones de campos electromagnéticos mucho más complejos, pasando de los simples dipolos eléctricos y magnéticos que usan el resto de aceleradores a configuraciones de cuádruplos, séxtuplos, óctuplos y mayores.

Estos aceleradores llevan asociado el uso de mayores capacidades tecnológicas e industriales, tales como y entre otras muchas:

- el desarrollo de superconductores, capaces de crear los campos electromagnéticos necesarios, sin la necesidad de elevar el consumo eléctrico hasta cotas impensables,
- sistemas de vacío, que permitan mantener las partículas en el conducto de aceleración, sin pérdidas del haz inadmisibles,
- superordenadores, capaces de calcular las trayectorias de las partículas en las distintas configuraciones simuladas y, posteriormente, asimilar las enormes cantidades de datos generadas en los análisis científicos de los grandes aceleradores como el LHC.

Al igual que en otras áreas de la tecnología de punta, existen múltiples desarrollos que se realizaron para su aplicación en estos aceleradores que forman parte de la vida cotidiana de las personas. Quizá el más conocido fue el desarrollo de la *World Wide Web* (comúnmente llamada web), desarrollado para su aplicación en el LEP.

La única forma de elevar aun más la energía de las partículas con estos aceleradores es incrementar su tamaño. Generalmente se toma como referencia la longitud del perímetro de la circunferencia. (Realmente no forman una circunferencia perfecta, sino un polígono lo más aproximado posible a

esta). Por ejemplo tendríamos el LEP con 26,6 km, capaz de alcanzar los 45 GeV (91 GeV para una colisión de dos haces en sentidos opuestos), actualmente reconvertido en el LHC del que se prevén energías hasta los 14 TeV.

Aceleradores de mayores energías

Existen varios proyectos para superar las energías que alcanzan los nuevos aceleradores. Estos aceleradores se espera que sirvan para confirmar teorías como la Teoría de la gran unificación e incluso para la creación de agujeros negros, que confirmarían la teoría de supercuerdas.

Para 2015-2020 se espera que se construya el Colisionador lineal internacional, un enorme linac de 31 km de longitud, inicialmente de 500 GeV que se ampliarían hasta 1 TeV. Este acelerador utilizará un láser enfocado en un fotocátodo para la generación de electrones.

Se cree que la aceleración de plasmas mediante láseres conseguirán un incremento espectacular en las eficiencias que se alcancen. Estas técnicas han alcanzado ya aceleraciones de 200 GeV por metro, si bien en distancias de algunos centímetros, en comparación con los 0,1 GeV por metro que se consiguen con las radiofrecuencias.

Fundamentos físicos

-Generación de partículas

Las partículas cargadas (las únicas que pueden acelerar los campos electromagnéticos presentes en los aceleradores) se generan de diversas formas. La forma más sencilla es utilizar el propio movimiento que se genera al calentar un material. Esto se hace habitualmente calentando un filamento hasta su incandescencia haciendo pasar por él una corriente eléctrica, aunque también se puede hacer enfocando un láser en él. Al aumentar la temperatura también aumenta la probabilidad de que un electrón del átomo lo abandone momentáneamente. Si no existe un campo electromagnético cerca que lo acelere en dirección contraria este electrón (cargado negativamente) regresaría al poco tiempo al átomo ionizado (positivamente) al atraerse las cargas opuestas. Sin embargo, si colocamos cerca del filamento una segunda placa, creando una diferencia de potencial entre el filamento y ésta, conseguiremos acelerar el electrón.

Si en esa placa efectuamos un pequeño agujero, y tras él un conducto al que se le haya extraído el aire, conseguiremos extraer electrones. Sin embargo, si no existe ese orificio, el electrón impactará contra la placa, generando rayos X.

Cuando se pretenden generar protones, sin embargo, es necesario ionizar átomos de hidrógeno (compuestos únicamente por 1 protón y 1 electrón). Para ello puede utilizarse como primera fase el sencillo acelerador de electrones descrito haciendo incidir el haz de electrones o de rayos X sobre una válvula rellena de gas hidrógeno. Si en esa válvula situamos de nuevo un par de placas sobre las que aplicamos un potencial se obtendrán por un lado electrones acelerados y, por el opuesto, protones acelerados. Un ejemplo de este tipo de aceleradores es el LANSCE, en el Laboratorio Nacional Los Álamos (Estados Unidos).

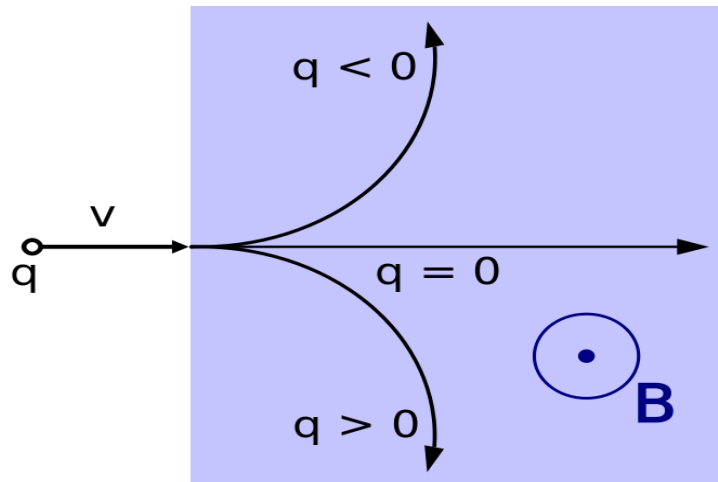
Los positrones se generan de forma similar, sólo que necesitaremos hacer incidir fotones de energías superiores a los 1,1 MeV sobre un blanco (de oro, tungsteno o cualquier otro material pesado). Esa energía es la mínima necesaria para crear un par electrón-positrón. La eficiencia de esta generación es muy pequeña, con lo que en los colisionadores electrón-positrón se gasta gran parte de la energía consumida en este proceso.

Actualmente existe también interés en generar neutrones para utilizarlos en máquinas transmutadoras. Para ello se utilizan protones generados como se ha descrito, que impactan sobre blancos cuya sección eficaz o probabilidad de generación de neutrones sea alta. Al no poder

acelerar más los neutrones (como se dijo, solo las partículas cargadas pueden acelerarse), su velocidad (o energía) final dependerá exclusivamente de la energía inicial del protón.

Prácticamente todas las partículas descritas se utilizan para tratamientos médicos, ya sea en diagnóstico (rayos X, TAC, PET), como en el tratamiento de tumores sólidos (El uso de protones y neutrones se está generalizando cada vez más para el tratamiento de tumores de difícil tratamiento).

-Ecuaciones de Lorentz



Representación gráfica de la fuerza de Lorentz (solo la parte debida al campo magnético, representado con dirección perpendicular a la pantalla y sentido hacia fuera de la misma).

Todos los aceleradores se rigen por las ecuaciones básicas del electromagnetismo desarrolladas por Maxwell. Sin embargo, existe una ecuación muy sencilla que sirve para definir las fuerzas que actúan en cada tipo de acelerador. Esta es la ecuación o ecuaciones (cuando se usan de forma separada) de Lorentz. La ecuación puede escribirse de forma básica como:

$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$

donde \vec{F} es la fuerza que sufre la partícula cargada dentro del campo electromagnético, q es la carga de la partícula (-1 para el electrón, +1 para el positrón o el protón, y mayores para núcleos pesados), \vec{E} es el valor del campo eléctrico, \vec{B} el campo magnético y \vec{v} la velocidad de la partícula. La ecuación se traduce en que la partícula recibe una aceleración que es proporcional a su carga e inversamente proporcional a su masa. Además, los campos eléctricos *empujan* a la partícula en la dirección del movimiento, (el sentido dependerá del signo de la carga y del sentido del propio campo eléctrico), mientras que los campos magnéticos *curvan* la trayectoria de la partícula. (Cuando actúa un campo magnético, la partícula seguirá una trayectoria circular, cuyo radio dependerá de la magnitud del campo magnético, de la velocidad que posea la partícula en ese momento y de su carga y masa.)

En resumen, los campos eléctricos aportan cambios en el módulo de la velocidad de la partícula, acelerándola o desacelerándola, mientras que los campos magnéticos la hacen describir trayectorias curvas, sin modificar su módulo. (Esto no es exactamente así, ya que las partículas perderán energía por la radiación sincrotrón, pero sirve como primera aproximación.)

- Componentes de un acelerador

Los aceleradores poseen componentes básicos :

1- Componentes generadores de fuerzas

- Dipolos eléctricos. Se aplica una diferencia de potencial, generando un campo eléctrico \vec{E} entre dos placas o tubos. Esto hace que la partícula se acelere, como entre dos fases de un linac.
- Dipolos magnéticos. Se crea un campo magnético \vec{B} generalmente de forma artificial (mediante bobinas), perpendicular a la trayectoria de la partícula de forma que la curva. Por ejemplo entre las D de un ciclotrón, haciéndola describir un arco de 180 grados para volver a la separación entre ambas. También para curvar ligeramente (arcos pequeños) el haz de partículas en un sincrotrón.
- Multipolos magnéticos. Se utilizan para *enfocar* los haces de partículas, de modo que los campos ejerzan sus acciones de forma más eficiente y se eviten pérdidas en el trayecto.

2- Blancos

Para *crear* las partículas generadas en los grandes aceleradores se necesitan blancos, donde las partículas impactan, generando una enorme cantidad de partículas secundarias.

Los blancos se pueden distinguir entre fijos o móviles. En los fijos se engloban todos aquellos que hacen impactar las partículas aceleradas contra un blanco inmóvil, como los aparatos de rayos X o los utilizados en la espalación. En los móviles se encuentran aquellos que hacen impactar las propias partículas entre ellas, por ejemplo en los colisionadores, duplicando de este modo de forma sencilla la energía que pueden alcanzar los aceleradores.

3- Detectores

Para *analizar* las partículas generadas en el impacto contra el blanco son necesarios los detectores, que actuarían como los ojos de los científicos.

Dos de los detectores más modernos contruidos para detectar las partículas creadas en las colisiones a las más altas energías conseguidas, son: CMS y ATLAS, instalados en el LHC.

Una versión sencilla del conjunto *acelerador-blanco-detector* sería el aparato de televisión. En este caso el tubo de rayos catódicos es el **acelerador**, que impulsa los electrones hacia la pantalla revestida de fósforo interiormente, que actuaría de **blanco**, transformando los electrones en fotones (con energía en el rango del visible) que, si estuviéramos mirando la televisión, impactarían en los conos y bastoncillos de nuestras retinas (**detectores**), enviando señales eléctricas a nuestro cerebro (el supercomputador), que interpreta los resultados.

APÉNDICE 5

El Universo presenta gran cantidad de simetrías. Por ejemplo, no hay un centro respecto del cual gire todo; cualquier punto del espacio puede considerarse el “centro” del Universo. Por lo tanto las leyes de la Física no dependen de dónde nos encontremos o que disposición adoptemos en el espacio. Si repetimos un experimento en una orientación distinta, el resultado será el mismo. Además, las leyes físicas no varían según en qué momento del tiempo se desarrolle el experimento. Los físicos consideran toda constancia o invariancia como una simetría de la naturaleza. Que las leyes sean las mismas mañana que las de ayer es una simetría en el movimiento en el tiempo. Que las leyes físicas sean las mismas en cualquier punto del espacio es una simetría en el movimiento en el espacio dentro del Universo.

Todo lo anterior fue resumido en un teorema desarrollado por una notable mujer y gran matemática: Emmy Noether. En éste afirma que toda fórmula matemática simétrica equivale a la existencia de una entidad física invariante y viceversa.

Desde el punto de vista algebraico, hay operaciones “geométricas” que pueden representar simetrías sobre figuras planas, por ejemplo triángulos y círculos. Sea un triángulo equilátero. Cualquier rotación de 120° alrededor de un eje, que pase por su centro y por uno de sus vértices, dejará invariante la figura. Si hacemos rotar al triángulo ángulos múltiplos de 120° , sucederá lo mismo. Es lo que se denomina “grupo de simetrías discretas”. Tomemos ahora un círculo. Si lo hacemos rotar alrededor de cualquier eje que pase por su centro, cualquier ángulo, quedará invariante. Es lo que se denomina “grupo de simetrías continuas”. Las operaciones de simetría sobre el círculo son conocidas como $U(1)$. Si quisiésemos representar en un cuadro todas las operaciones de simetría discretas, se podrían resumir en una tabla. No así las operaciones de simetría continuas, por lo que se usa el concepto de “generadores” del grupo. Estos generadores constituyen un sistema matemático propio, denominado Algebra de Lie. Los grupos de Lie están asociados a la conservación de magnitudes físicas. La clasificación de todas las álgebras de Lie agrupa las simetrías del siguiente modo:

- simetrías rotacionales de esferas en espacios de N dimensiones con coordenadas reales $O(2) = U(1)$, $SO(3) = SO(2)$, $S(4)$, $SO(5) \dots SO(N)$
- simetrías rotacionales de esferas en espacios de N dimensiones con coordenadas complejas $U(1)$, $SU(2)$, $SU(3)$, $SU(4)$, $SU(5) \dots SU(N)$
- grupos simplécticos que corresponden a las simetrías de N osciladores armónicos $Sp(2)$, $Sp(4) \dots Sp(2N)$
- grupos excepcionales G_2, F_4, E_6, E_7 y E_8 .

Estas simetrías son relevantes en la Mecánica Cuántica, debido a que el estado físico de un sistema es contemplado como un vector en un espacio complejo. (Es una descripción más fundamental que la función de onda). Por ejemplo, el color de un quark es un vector en un espacio tridimensional de coordenadas complejas en que los ejes se denominan “rojo”, “azul” y “amarillo” y el grupo de simetría del color es $SU(3)$.

En la siguiente tabla se da una breve relación entre simetría-invariante

²⁷ La Simetría y la Belleza del Universo. Leon M Lederman y Christopher Hill. Tusquets editores para Metatemas. Ed. 2006

SIMETRIA	MAGNITUD FÍSICA CONSERVADA
Traslación temporal	Energía
Traslación espacial	Cantidad de movimiento
Rotación espacial	Momento angular
$U(1)$	Carga eléctrica
$U(2)$	Fuerza electrodébil
$SU(2)$	Isoespín
$SU(3)$	Color del quark

Bibliografia

-Películas

- Mervyn Le Roy. *Madame Curie*. Metro Goldwyn Mayer. 1943. EEUU
- Joseph Sargent. *Día Uno*. 1989. Cadena CBS. EEUU
- Howard Davies. *Copenhague*. 2002. [BBC Four](#), en asociación con [KCET](#). Gran Bretaña

-Libros

- a. Leon M Lederman y Christopher Hill. *La Simetría y la Belleza del Universo*. Tusquets editores para Metatemáticas. Ed. 2006
- b. de Florian, Daniel. *Una expedición al mundo subatómico*. 2007. Colección Ciencia Joven. EUDEBA
- c. Nambu, Yoshiro. *What is Quantum Mechanics? A Physics Adventure*. Second edition 2009. Language Research Foundation. Cambridge, Massachusetts
- d. Eisberg, Robert y Resnick, Robert. *Física Cuántica. Átomos, Moléculas, Sólidos, Núcleos y Partículas*. 2012. Editorial Limusa, México.
- e. Joven Alvarez, Enrique. *Dalton. La teoría atómica. ¿Cuánto pesan los átomos?* 2014. Grandes ideas de la ciencia. Argentina
- f. Arroyo Pérez, Eduardo. *Boltzmann. La termodinámica y la entropía. El universo morirá de frío*. 2014. Grandes ideas de la ciencia. Argentina
- g. Muñoz Paez, Adela. *Marie Curie. La radioactividad y los elementos. El secreto mejor guardado de la materia*. 2014. Grandes ideas de la ciencia. Argentina
- h. Pérez Izquierdo, Alberto Tomás. *Planck. La teoría cuántica. La revolución de lo muy pequeño*. 2014. Grandes ideas de la ciencia. Argentina
- i. Corcho Orrit, Roger. *Rutherford. El núcleo atómico. Los átomos también tienen corazón*. 2014. Grandes ideas de la ciencia. Argentina
- j. Navarro, Jaume. *Niels Bohr. El átomo cuántico. Pasaporte cuántico a otro estado*. 2014. Grandes ideas de la ciencia. Argentina
- k. Corcho Orrit, Roger. *Meitner. La fisión nuclear. Uranio partido por dos, igual a energía*. 2014. Grandes ideas de la ciencia. Argentina
- l. Hernandez, Fernandez, Antonio. *Fermi. La energía nuclear. La fisión hace fuerza*. 2014. Grandes ideas de la ciencia. Argentina
- m. Blanco Laserna, David. *Schrödinger. Las paradojas cuánticas. El universo está en la onda*. 2014. Grandes ideas de la ciencia. Argentina
- n. Navarro Faus, Jesús. *Heisenberg. El principio de incertidumbre. ¿Existe el mundo cuando no lo mirás?*. 2014. Grandes ideas de la ciencia. Argentina

-Links

- <http://www.feiasofi.net/images/revistaibfisica/num6/textos/foro.pdf>
- http://reuredc.uca.es/index.php/tavira/article/viewFile/150/pdf_40
- <http://arxiv.org/ftp/physics/papers/0609/0609154.pdf>
- <http://www.intuitior.com/moviephysics/>
- <http://www.noticiasdelcosmos.com/2010/03/la-fisica-en-el-cine.html>
- [Studying physics in films](#), por Michael Banks en physicsworld.com : [Cinema física](#)
- [Ciencia, Científicos y Ciencia Ficción](#), por Miguel Leiva Marquez
- [The 5 Best and Worst Science Based Movies of All Time](#)
- [Físicos enumeran los peores errores científicos de Hollywood](#)
- <http://jemaba.bligoo.es/fisica-vs-ciencia-ficcion>
- http://es.wikipedia.org/wiki/Aprendizaje_significativo